

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1/2017

CONTROL  SCIENCES

Редакционный совет

Акад. РАН С.Н. Васильев, акад. РАН С.В. Емельянов, акад. РАН И.А. Каляев, акад. РАН В.А. Левин, чл.-корр. РАН Н.А. Махутов, акад. РАН Е.А. Микрин, чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко, чл.-корр. РАН А.Ф. Резчиков, акад. РАН Е.А. Федосов

Редколлегия

Д-ра техн. наук Ф.Т. Алескеров, В.Н. Афанасьев, Н.Н. Бахтадзе, канд. техн. наук Л.П. Боровских (зам. гл. редактора), д-ра техн. наук В.Н. Бурков, В.А. Виттих, В.М. Вишневский, д-р экон. наук М.И. Гераськин, д-р техн. наук А.А. Дорофеюк, д-р экон. наук В.В. Клочков, д-ра техн. наук С.А. Краснова, О.П. Кузнецов, В.В. Кульба, А.П. Курдюков, д-ра физ.-мат. наук А.Г. Кушнер, А.А. Лазарев, д-р техн. наук В.Г. Лебедев, д-р психол. наук В.Е. Лепский, д-р техн. наук А.С. Мандель, д-р биол. наук А.И. Михальский, чл.-корр. РАН Д.А. Новиков (гл. редактор), д-ра техн. наук Б.В. Павлов, Ф.Ф. Пашенко (зам. гл. редактора), д-р физ.-мат. наук Л.Б. Рапопорт, д-ра техн. наук Е.Я. Рубинович, В.Ю. Рутковский, д-р физ.-мат. наук М.В. Хлебников, д-р техн. наук А.Д. Цвиркун, д-р физ.-мат. наук П.Ю. Чеботарёв, д-р техн. наук И.Б. Ядыкин

Руководители региональных редакционных советов

Владивосток – д-р техн. наук О.В. Абрамов (ИАПУ ДВО РАН)
Волгоград – д-р физ.-мат. наук А.А. Воронин (ВГУ)
Воронеж – д-р техн. наук С.А. Баркалов (ВГАСУ)
Курск – д-р техн. наук С.Г. Емельянов (ЮЗГУ)
Липецк – д-р техн. наук А.К. Погодаев (ЛГТУ)
Пермь – д-р техн. наук В.Ю. Столбов (ПНИПУ)
Ростов-на-Дону – д-р техн. наук Г.А. Угольницкий (ЮФУ)
Самара – д-р техн. наук В.Г. Засканов (СГАУ)
Саратов – д-р техн. наук В.А. Твердохлебов (ИПТМУ РАН)
Уфа – д-р техн. наук Б.Г. Ильясов (УГАТУ)



CONTROL SCIENCES

**Научно-технический
журнал**

6 номеров в год

ISSN 1819-3161

Издается с 2003 года

УЧРЕДИТЕЛЬ

Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

Главный редактор
чл.-корр. РАН

Д.А. Новиков

Заместители главного
редактора

Л.П. Боровских, Ф.Ф. Пашенко

Редактор

Т.А. Гладкова

Выпускающий редактор

Л.В. Петракова

Издатель

ООО «Сенсидат-Плюс»

Адрес редакции
117997, ГСП-7, Москва,
ул. Профсоюзная, д. 65, к. 410.
Тел./факс (495) 334-92-00
E-mail: pu@ipu.ru
Интернет: <http://pu.mtas.ru>

Фото на четвертой странице обложки
В.М. Бабилова

Оригинал-макет и электронная
версия подготовлены
ИП Прохоров О. В.

Отпечатано в ООО «Авансд солюшнз»

Заказ № PB117

Подписано в печать
30.01.2017 г.

Журнал зарегистрирован
в Министерстве Российской
Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств
массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-49203 от 30 марта 2012 г.

Журнал входит в RSCI на платформе
Web of Science и Перечень
рецензируемых научных изданий ВАК

Подписные индексы:

80508 и **81708** в каталоге Роспечати;
38006 в объединенном каталоге
«Пресса России»

Цена свободная

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1.2017

СОДЕРЖАНИЕ

Управление в социально-экономических системах

Корноушенко Е.К. Простой алгоритм номинальной классификации
по качественным признакам 2

Стенников В.А., Пеньковский А.В., Хамисов О.В. Поиск равновесия
Курно на рынке тепловой энергии в условиях конкурентного поведения
источников тепла 10

Белов М.В. Модели управления численностью сотрудников
предприятия 19

Асанов А.З., Мышкина И.Ю. Исследование возможности применения
нейронных сетей при решении задачи отбора команды для реализации
проекта 31

Гусев В.Б., Исаева Н.А. Экспертный анализ системы управления
нематериальными активами с учетом оценок рисков 40

Информационные технологии в управлении

Стецюра Г.Г. Компьютерная сеть с быстрой распределенной
перестройкой своей структуры и обработкой данных в процессе
их передачи 47

Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Построение
самопроверяемых структур систем функционального контроля
на основе равновесного кода «2 из 4» 57

Управление сложными технологическими процессами и производствами

Григорьев Л.И., Чернышева О.Н., Кучерявый В.В. Оценка
профессионально важных психологических характеристик
диспетчера в человеко-машинных системах АСУТП нефтегазового
производства 65

Управление подвижными объектами и навигация

Макриденко Л.А., Геча В.Я., Сидняев Н.И. и др. Определение
высотных характеристик электрических ракетных двигателей
космического аппарата методами планирования эксперимента 75

* * *

Contents and abstracts 88

ПРОСТОЙ АЛГОРИТМ НОМИНАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПО КАЧЕСТВЕННЫМ ПРИЗНАКАМ

Е.К. Корноушенко

Предложен альтернативный подход к классификации по качественным признакам, отличающийся от известных подходов тем, что вместо сравнения кортежа значений признаков тестового объекта с аналогичными кортежами значений признаков объектов обучающей выборки производится независимое попарное сравнение каждой пары значений соответствующих кортежей признаков сравниваемых объектов. Это позволяет сформировать матрицу весов признаков для каждого тестового объекта, более детальную, чем ближайшая окрестность тестового объекта. В рамках данного подхода предложен простой алгоритм классификации, обладающий рядом важных особенностей в плане интерпретации результатов классификации. На примере несбалансированной выборки из известного репозитория UCI проверено качество алгоритма. Показано, что алгоритм обеспечивает хорошую точность классификации объектов «малых» классов.

Ключевые слова: классификация, ближайшая окрестность, метка класса, взвешенное голосование, взвешивание признаков, матрица весов признаков.

ВВЕДЕНИЕ

Классификация — одно из направлений в обширной области интеллектуального анализа данных (*data mining*). Различают три вида классификации:

— классификация «с учителем» (*supervised classification*), когда исходные данные, отнесенные к разным категориям, называемым классами, разбиваются на две выборки — на обучающей выборке производится обучение (настройка) применяемого алгоритма, а на контрольной — собственно классификация и оценка его качества;

— классификация «без учителя» (*unsupervised classification*), когда на исходных данных формируются классы с помощью различных процедур группировки данных (как правило, процедур кластеризации);

— гибридная классификация, когда сгруппированные данные разбиваются на обучающую и контрольную выборки.

Систематизация подходов, применяемых в классификации «с учителем», требует отдельного

рассмотрения, укажем лишь основные из известных подходов. Это — метрический подход, базирующийся на использовании той или иной метрики при сравнении классифицируемого объекта с объектами обучающей выборки и введении понятия «ближайшей окрестности» тестового объекта (см. например, работы [1—6]), теоретико-информационный подход, базирующийся на изменении энтропии вероятностных распределений при учете тех или иных признаков классифицируемых объектов (к нему относятся, например, алгоритмы с использованием деревьев решений [7—10], алгоритмы ассоциативной классификации [11—13]), подход с формированием недоопределенных множеств (*rough sets*) [14—17]), а также многокритериальные методы принятия решений (см. например, работы [18—20]).

В настоящей работе рассматривается альтернативный подход к классификации с использованием понятия «ближайшей окрестности» тестового объекта. Суть предлагаемого подхода состоит в том, что вместо обычного сравнения в целом кортежа значений признаков тестового объекта с кортежами значений признаков объектов обучающей



выборки рассматривается попарное независимое сравнение соответствующих значений признаков из сравниваемых кортежей. В работе рассматривается случай номинальной классификации по качественным признакам, в этом случае считаем, что значения качественных признаков суть их наименования¹ [21]. При этом если качественный признак является ординальным, каждое из его значений будет рассматриваться как номинальный признак. Для каждого номинального признака тестового объекта формируется множество из объектов обучающей выборки с тем же значением (именем) сравниваемого признака, и каждому из таких объектов приписывается определенный вес. После аналогичного рассмотрения значений всех признаков формируется матрица весов тестового объекта (а не вектор весов, как в известных алгоритмах классификации). Показано, что в результате предложенных процедур алгоритм классификации обладает рядом свойств, выгодно отличающих его от известных алгоритмов данного направления.

Применение предлагаемого алгоритма показано на примере выборки из известного репозитория UCI (*UCI Machine Learning Repository*) [22], описывающей результаты психологического эксперимента и характеризующейся тем, что классы наблюдений сильно различаются по мощности, т. е. образуют несбалансированную выборку. В рамках предлагаемого алгоритма классификации предложены три варианта взвешивания объектов обучающей выборки и показано, как выбор того или другого варианта влияет на качество классификации объектов тестовой выборки.

Данная статья построена следующим образом. В рамках подхода, базирующегося на понятии «ближайшей окрестности», в § 1 приводятся краткие сведения по эволюции процедур этого подхода (переход от невзвешенного голосования к тому или иному виду взвешенного голосования, к взвешиванию признаков объектов, входящих в ближайшую окрестность тестового объекта, использование различных метрик при сравнении объектов). В § 2 описываются этапы предлагаемого алгоритма номинальной классификации по качественным признакам. В § 3 показаны особенности и отличия процедур, применяемых на том или ином этапе алгоритма, от аналогичных процедур, упомянутых в § 1. В § 4 показано применение предлагаемого алгоритма к конкретной выборке и обсуждаются полученные результаты.

¹ Хотя в данном случае понятие «признак» и «значение признака» совпадают, будем пользоваться понятием значения признака как более «привычным».

1. КЛАССИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ ПОНЯТИЯ «БЛИЖАЙШЕЙ ОКРЕСТНОСТИ»

1.1. Исходные данные

Здесь исходной информацией для построения алгоритмов классификации служит конечная выборка объектов. Для наглядности изложения в качестве объектов будем рассматривать физические объекты той или иной природы (объекты недвижимости, продукты, лекарства и др.) и считать, что каждый объект исходной выборки характеризуется некоторой совокупностью признаков из заданного набора количественных и/или качественных признаков. Количественные признаки могут принимать любые действительные значения внутри соответствующих интервалов. А качественные признаки подразделяются на номинальные, ординальные, интервальные и признаки отношений (*ratio features*). Каждый из видов качественных признака характеризуется соответствующей шкалой, отображающей значения этого признака и их взаимное расположение. Самой «слабой» шкалой является шкала наименований [21] для номинальных признаков, когда каждый используемый в выборке номинальный признак кодируется каким-либо образом (числом, символом, словом и т. п.). Всякий ординальный признак имеет несколько значений, и на шкале значений ординального признака определено отношение порядка. Другие виды качественных признаков здесь не рассматриваются. Признаки называются независимыми, если изменения значений одного из признаков не влияют на значения других признаков, в противном случае признаки зависимы.

Принципиальный момент в классификации «с учителем» — введение на исходной выборке разбиения объектов на классы. Понятие класса нельзя определить априори до окончания формирования исходной выборки. Вид вводимого разбиения зависит от пользователя: разбиение может состоять из двух блоков, когда пользователь руководствуется двумя оценками помещаемых в выборку объектов (объект соответствует выбранному критерию или нет), либо из нескольких блоков при использовании нескольких оценок. В итоге каждому объекту исходной выборки однозначно приписывается номер (*метка, label*) того класса, к которому принадлежит данный объект. Далее исходная выборка разбивается на обучающую и тестовую выборки (соответственно ОВ и ТВ). Каждый класс может содержать объекты из ОВ и ТВ. Если некоторый класс содержит объекты из ОВ и ТВ, то метки таких объектов совпадают, причем множества объектов из ОВ и ТВ с одной и той же меткой могут существенно различаться по мощ-

ности. Метки объектов ТВ не участвуют в процедурах классификации, а служат лишь для анализа качества алгоритма классификации, в частности, для проверки его точности и наполняемости классов в ТВ (об этом см. ниже). Суть классификации состоит в том, чтобы «вложить» каждый объект ТВ в некоторый класс введенного разбиения таким образом, при котором номер этого класса как результат процедуры классификации совпадает с исходной меткой этого объекта в ТВ, и оценить точность классификации.

1.2. Процедура сравнения объектов исходной выборки

Введем понятие кортежа признаков. Поскольку в набор выбранных признаков для классификации объектов исходной выборки могут входить качественные признаки (с закодированными значениями, см. выше), совокупность значений признаков (количественных и качественных), характеризующих конкретный объект, будем называть *кортежем* признаков этого объекта. Для сравнения кортежей признаков двух объектов (обязательный этап, присутствующий в алгоритмах данного направления) необходима их предварительная нормализация, т. е. отображение значений соответствующих признаков в интервал $[0, 1]$. При этом если a_i — значение количественного признака a , то его нормализованное значение можно определить, в частности, по формуле минимаксной нормализации: $a_{i\text{норм}} = \frac{a_i - \min(a_i)}{\max(a_i) - \min(a_i)}$. При сравнении

качественных признаков с закодированными значениями учитывается лишь совпадение (или несовпадение) кодов этих значений². При совпадении кодов разности этих значений приписывается 0, а при несовпадении — 1. В качестве мер отличия двух кортежей чаще применяются евклидово расстояние и расстояние Махаланобиса (здесь не рассматривается).

1.3. Суть kNN -алгоритма и его модификации

Идея использования понятия «ближайшей окрестности» довольно проста (см., например, работу [1]). Кортеж признаков тестового объекта Z сравнивается с кортежем признаков каждого объекта ОВ и выделяется заданное число (скажем, k) ближайших (по расстоянию) к Z объектов из ОВ,

которые образуют *ближайшую окрестность* $NN_k(Z)$ (*Nearest Neighborhood*) объекта Z . Совокупность меток объектов из окрестности $NN_k(Z)$ обозначим как $L_k(Z)$. Класс, к которому будет отнесен объект Z , выбирается путем невзвешенного голосования, т. е. из множества $L_k(Z)$ выбирается метка с наибольшим числом вхождений в $L_k(Z)$. На такой простой идее базируется известный kNN -алгоритм [1, 2] и его более сложные модификации, использующие тот или иной алгоритм взвешиваний как меток, так и признаков объектов [3—6].

1.3.1. Взвешенное голосование [3—5, 23, 24]

Для повышения точности kNN -алгоритма были предложены различные методы взвешивания меток из множества $L_k(Z)$, причем веса меток определялись тем или иным образом через расстояние (как правило, евклидово, обозначаемое далее как d_i^{NN}) от объекта x_i^{NN} из окрестности $NN_k(Z)$ до тестового объекта Z . Одной из первых в этом направлении была работа [3]: расстояния d_i^{NN} упорядочивались в возрастающем порядке и вес i -го объекта из окрестности $NN_k(Z)$ определялся как

$$w_i = \frac{d_k^{NN} - d_i^{NN}}{d_k^{NN} - d_1^{NN}}, \quad i = 1, \dots, k, \quad \text{причем } w_i = 1 \text{ при}$$

$d_k^{NN} = d_1^{NN}$. Веса, относящиеся к одной и той же метке, суммировались, и в качестве искомой метки выбиралась метка с наибольшим суммарным весом. В случае $k = 1$ этот метод совпадал с невзвешенным голосованием. В работах [4, 5] предложена дуальная структура веса w_i :

$$w_i = \frac{d_k^{NN} - d_i^{NN}}{d_k^{NN} - d_1^{NN}} \cdot \frac{1}{i}, \quad i = 1, \dots, k,$$

и говорится, что при этом распределение совокупностей меток во множестве $L_k(Z)$ становится более «контрастным» и менее зависящим от значений признаков объекта Z . Более сложные процедуры взвешенного голосования, требующие отдельных комментариев, предложены в работах [23, 24].

1.3.2. Взвешивание признаков объектов [6, 25—28]

При более глубоком анализе свойств «ближайшей окрестности» выяснились некоторые обстоятельства (влияющие на качество kNN -алгоритма и, прежде всего, на его чувствительность к помехам), обусловленные тем фактом, что при классифика-

² Поскольку в данной работе вопросы, связанные с упорядочением значений ординального признака, не рассматриваются, каждое из его значений интерпретируется как номинальное значение.



ции все признаки рассматривались как равноправные, хотя по структуре той или иной задачи одни признаки могут быть более значимыми³ для правильной классификации, нежели другие. Таким образом, помимо проблемы взвешивания меток классов возникает проблема взвешивания признаков, когда более важным признакам присваивается больший вес. Исследование проблемы взвешивания признаков началось с работы [6] и продолжается в многочисленных работах (см., например, работы [25—28]). В рамках классификации «с учителем» и использования понятия «ближайшей окрестности» входными переменными служат признаки объектов ОВ и тестового объекта. Из совокупности методов взвешивания признаков следует выделить семейство алгоритмов *Relief* [25—27] как наиболее проработанных и применяемых при построении регрессионных моделей и в задачах классификации. В основе алгоритмов семейства *Relief* лежит неявное предположение о том, что дисперсия значений признаков, принадлежащих объектам из одного и того же класса, должна быть меньше аналогичной дисперсии значений признаков объектов из разных классов, причем такая разница в значениях дисперсии должна быть большей для более значимых признаков [25]. На каждой итерации для выбранного объекта x определяются две ближайших окрестности: одна (обозначаемая как $NH(x)$) из объектов того же класса, что и класс объекта x , а другая — $NM^{(i)}(x)$ — из объектов, принадлежащих классам, отличным от класса объекта x . Пусть $x^{(i)}$ — значение i -го признака в кортеже признаков объекта x , а $NH^{(i)}(x)$ и $NM^{(i)}(x)$ — значение i -го признака в объектах из совокупностей $NH(x)$ и $NM(x)$. Вес w_i i -го признака объекта x вычисляется по правилу [25]:

$$w'_i = w_i + |x^{(i)} - NM^{(i)}(x)| - |x^{(i)} - NH^{(i)}(x)|.$$

Таким образом, наличие объектов в окрестности $NH(x)$ приводит к уменьшению веса w_i i -го признака, тогда как наличие в окрестности $NM(x)$ объектов приводит к увеличению веса w_i i -го признака. При этом расстояние между двумя объектами определяется как сумма весов соответствующих признаков (манхэттенское расстояние). Первоначально алгоритм *Relief* был разработан для случая бинарной классификации. Обобщение этого подхода на случай большего числа классов (*ReliefF*) дано в работах [25—27]. Суть алгоритма *ReliefF* [26]

из семейства *Relief* состоит в итеративной оценке весов признаков с тем, чтобы усилить различия в свойствах ближайших окрестностей каждого из объектов ОВ.

2. ПРОСТОЙ АЛГОРИТМ НОМИНАЛЬНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ПО КАЧЕСТВЕННЫМ ПРИЗНАКАМ

Исходная выборка — такая же, как в п. 1.1, с учетом того, что длина ОВ равна S , а длина ТВ равна T и каждый объект исходной выборки имеет m качественных признаков (номинальных или ординальных). На множестве объектов исходной выборки определено разбиение $\pi = (C_1, \dots, C_K)$ на классы, и каждый объект ОВ и ТВ принадлежит к какому-либо одному из K классов разбиения π . Обозначим через $\pi_{ОВ}$ ($\pi_{ТВ}$) подразбиение разбиения π , блоки которого содержат только объекты из ОВ (ТВ). Метки объектов ТВ не участвуют в процедурах классификации, а служат лишь для анализа качества применяемого алгоритма классификации, в частности, для проверки его точности и заполняемости классов подразбиения $\pi_{ТВ}$ (об этом см. ниже) в процессе классификации объектов ТВ.

Для корректной работы предлагаемого ниже алгоритма номинальной классификации (далее просто Алгоритма) вводятся следующие ограничения.

1. Поскольку все признаки объектов ОВ и ТВ в Алгоритме рассматриваются как номинальные, код каждого признака в объектах ТВ должен совпадать с кодом этого признака, присутствующего в кортежах некоторых объектов ОВ.

2. Никакой класс разбиения π не может целиком содержаться в ТВ.

3. В объектах ОВ и ТВ не допустимы неопределенные значения признаков и меток классов. Факт отсутствия данного признака⁴ в рассматриваемом объекте обозначается символом 0.

Основная особенность Алгоритма в том, что вместо сравнения кортежа признаков тестового объекта и объектов из ОВ попарно сравниваются коды каждого из признаков тестового объекта с кодами соответствующих признаков объектов из ОВ. Результатом сравнения двух кодов может быть лишь их совпадение (согласно ограничению 1) или несовпадение (при отсутствии данного (значения) признака в кортеже признаков сравниваемого объекта). Это позволяет для каждого признака A тестового объекта Z определить совокупность $[Z]_A$ из объектов ОВ, кортежи которых содержат признак A

³ Значимость признака определяется в процессе его дальнейшего использования при построении регрессионных моделей и/или алгоритмов классификации.

⁴ Данное замечание касается лишь ординальных признаков, имеющих несколько значений, интерпретируемых как независимые номинальные подпризнаки (со своими подкодами) кода исходного признака.

Таблица 1

Общий вид матрицы весов M_Z для тестового объекта Z

	A_1	A_2	...	A_m
C_1	g_{11}	g_{21}	...	g_{m1}
C_2	g_{12}	g_{22}	...	g_{m2}
...	...	...	...	...
C_K	g_{1K}	g_{2K}	...	g_{mK}

(а при ординальном A — код его соответствующего значения). Пусть M_{A_v} — число объектов из совокупности $[Z]_A$ таких, что эти объекты входят в блок C_v разбиения $\pi_{ОВ}$ (т. е. имеют метку v). Сопоставим совокупности этих объектов число $g_{A0} = M_{A_v}/|[Z]_A|C_v|$, где $[Z]_A$ и C_v — соответственно мощности множеств $[Z]_A$ и класса C_v разбиения $\pi_{ОВ}$, $1 \leq v \leq K$. Отношение $M_{A_v}/|[Z]_A|$ есть, по существу, показатель «доверия» (*confidence*⁵) к утверждению, что всякий объект из ОВ с признаком A относится к классу C_v . Обратим внимание на то, что показатели доверия взвешиваются с помощью множителей $1/|C_v|$, где v — метка класса, к которому относится тот или иной показатель «доверия»⁷. Найденное число g_{A_v} будем рассматривать как вес метки v в множестве меток объектов из множества $[Z]_A$. Подобным образом найдем множество M_{A_μ} для объектов из множества $[Z]_A$, принадлежащих другим классам C_μ , $\mu \neq v$, из разбиения $\pi_{ОВ}$, и вычислим вес g_{A_μ} каждой метки μ . Сформируем K -вектор весов $G_A = (g_{A1}, g_{A2}, \dots, g_{AK})^T$ для признака A объекта Z . Заметим, что все координаты в векторе G_A — не отрицательные и не больше единицы. Вектор весов G_A можно интерпретировать как локальный (по признаку A) классификатор для объекта Z .

Аналогичным образом найдем столбцы весов для всех m признаков объекта Z и сгруппируем эти

столбцы в матрицу M_Z размера $K \times m$, которую назовем *матрицей весов* объекта Z . Структура матрицы M_Z показана в табл. 1, где $A_1, A_2, \dots, A_m$ — признаки объектов, а $C_1, \dots, C_K$ — блоки разбиения $\pi_{ОВ}$.

Номер строки матрицы M_Z с наибольшей суммой весов будем считать меткой класса, к которому отнесем объект Z . На основе матрицы весов M_Z можно получить три варианта голосования в зависимости от определения элементов g_{ij} , $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, K$.

Вариант 1. Если $g_{A_v} = M_{A_v}$ — обычное невзвешенное голосование.

Вариант 2. Если $g_{A_v} = M_{A_v}/|[Z]_A|$ — голосование со взвешиванием показателей «доверия».

Вариант 3. Если $g_{A_v} = M_{A_v}/|[Z]_A|C_v|$ — голосование со взвешиванием меток из множества M_{A_v} , скорректированных с учетом показателей «доверия» и мощностей блоков разбиения $\pi_{ОВ}$. Данный вариант используется с применением к строкам матрицы M_Z преобразования (1) (см. ниже).

Рассмотрим матрицу M_Z как совокупность локальных (по признакам объекта Z) классификаторов. С учетом сказанного в работе [31] относительно усиления классифицирующей способности совокупности локальных классификаторов путем введения монотонного нелинейного отображения преобразуем строки M_{Z_μ} матрицы M_Z с помощью монотонной нелинейной функции

$$E(M_{Z_\mu}) = \left(\sum_{A \in A_Z} g_{A_\mu} \log_2(g_{A_\mu}) | g_{A_\mu} > 0 \right),$$

$$\mu = 1, \dots, K, \quad (1)$$

где A_Z — кортеж признаков объекта Z .

Поскольку значения g_{A_μ} не являются в общем случае вероятностными величинами, выражение (1) назовем в соответствии с работой [31] *квазиэнтропией* строки M_{Z_μ} матрицы M_Z . Сформируем вектор $H_Z = (E(M_{Z_1}), \dots, E(M_{Z_K}))$, который назовем *классифицирующим вектором* для объекта Z . Номер координаты вектора H_Z с наибольшим значением принимается как искомая метка класса разбиения π , приписываемая тестовому объекту Z . Аналогичным образом производится классификация остальных объектов ТВ (а также классификация объектов без меток, удовлетворяющих ограничениям 1–3).

Считается, что тестовый объект Z правильно классифицирован, если приписанная ему метка класса разбиения π совпадает с исходной меткой этого объекта в разбиении $\pi_{ТВ}$. Точность всякого алгоритма классификации определяется как отно-

⁵ Понятие *confidence* употребляется во многих алгоритмах классификации (см., например, работы [29, 30]), где подчеркивается важность использования данного понятия для повышения точности классификации.

⁶ Другими словами, это означает степень «доверия» тому, что класс C_v помимо некоторых объектов из ОВ, входящих в множество $[Z]_A$, содержит и тестовый объект из ТВ.

⁷ Как показывают многочисленные эксперименты, подобное взвешивание показателей «доверия» способствует лучшему наполнению блоков разбиения при классификации Алгоритма (см. далее Пример, § 4).



шение числа правильно классифицированных объектов к длине ТВ.

Однако точность служит лишь одним из качеств алгоритма классификации. При наличии классов с сильно различающейся мощностью («несбалансированная» выборка) основную «нагрузку» при классификации может брать на себя класс с наибольшей мощностью, и высокий процент правильной классификации может не означать хорошей классификации объектов из классов с небольшой мощностью, хотя во многих практических задачах именно такие классы представляют особый интерес. Проблема классификации в случае несбалансированных выборок детально рассмотрена в работе [32]. В ряде публикаций приводятся оценки степени несбалансированности выборки. В случае нескольких классов известны попытки учесть подобную ситуацию путем введения той или иной меры «наполнения» всех классов при классификации объектов ТВ (см., например, работу [33]). В этом плане практически целесообразным может быть использование так называемого *коэффициента Кrippендорфа* (см., например, работу [34]). В данном Алгоритме предлагается использовать меру $\mu(\text{ТВ})$ наполняемости классов подразделения $\pi_{\text{ТВ}}$ при классификации объектов ТВ:

$$\mu(\text{ТВ}) = \frac{1}{T} \sum_{v=1}^K \frac{|\hat{C}_v(\text{ТВ})|}{|C_v(\text{ТВ})|},$$

где T — число объектов ТВ, $|C_v(\text{ТВ})|$ — число объектов ТВ в классе C_v разбиения $\pi_{\text{ТВ}}$, $|\hat{C}_v(\text{ТВ})|$ — число правильно классифицированных объектов ТВ в классе C_v . Значения показателя $\mu(\text{ТВ})$ определены в интервале $[0, 1]$. Использование меры $\mu(\text{ТВ})$ для оценки качества классификации конкретной выборки показано на примере в § 4. Детальный анализ связи меры $\mu(\text{ТВ})$ со структурой исходной выборки и особенностями алгоритма классификации выходит за рамки настоящей работы.

3. ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМА КЛАССИФИКАЦИИ

• Поскольку вместо сравнения в целом кортежа признаков тестового объекта Z с кортежами признаков объектов ОВ каждый из номинальных признаков сравниваемых объектов рассматривается по отдельности и независимо, то появляется возможность обойтись без нормализации кортежей сравниваемых объектов. Нормализованная разность двух кортежей с номинальными признаками является двоичным вектором (с координатами $(0, 1)$), и евклидова норма разности инвариантна к перестановкам нулей и единиц в этой разности.

Это означает, что в «ближайшую окрестность» объекта Z попадут объекты, дающие при сравнении с объектом Z не изменяющееся число нулей и единиц в соответствующих разностях. Число таких объектов растет с увеличением длины ОВ и ухудшает точность и качество применяемого варианта kNN -алгоритма.

• В матрице весов M_Z каждого объекта Z из ТВ подробно раскрыта структура множества весов, приписываемых объектам из множества, по признакам и по классам. Используемые в Алгоритме процедуры взвешивания признаков принципиально отличаются от аналогичных процедур, описанных в пп. 1.3.1 и 1.3.2. Информация, содержащаяся в матрице M_Z , намного «богаче» той, которая содержится в «ближайшей окрестности» каждого объекта Z из ТВ в kNN -алгоритмах. Матрицы M_Z позволяют исследовать влияние того или иного признака на процесс классификации объектов ТВ. Подобная информация может оказаться весьма полезной при анализе влияния признаков на процесс классификации в практических задачах. А тот факт, что в предложенном алгоритме признаки рассматриваются и сравниваются по отдельности, открывает возможности для выбора самых «экзотических» свойств для определения признаков при классификации объектов.

• Вычислительную сложность Алгоритма можно оценить как $O(mST)$. Заметим, что структура Алгоритма содержит лишь циклы, на которых определены соответствующие арифметические операции, управляемые условными операторами. Это позволяет реализовать Алгоритм в формате Excel, без привлечения более сложных компьютерных средств, что делает Алгоритм доступным для широкого круга пользователей.

4. ПРИМЕР: НОМИНАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПРИ НЕСБАЛАНСИРОВАННОЙ ВЫБОРКЕ

Для иллюстрации качества Алгоритма была взята выборка с названием «Balanced Scale» из репозитория UCI [22]. Выборка, содержащая результаты психологического эксперимента, включает в себя 625 наблюдений, каждое из которых содержит четыре качественных признака с пятью номинальными значениями (1—5). Все наблюдения разбиты на три класса, два из которых содержат по 288 элементов, а третий — 49 элементов, так что выборка несбалансированная. Перед применением к этой выборке предлагаемого Алгоритма из нее выделялись ОВ и ТВ путем попеременного отнесения текущих наблюдений то к ОВ, то к ТВ. Таким обра-

Качество Алгоритма при разных вариантах определения элементов g_{ij} матрицы M_Z

Варианты определения элементов матрицы M_Z	Наполненность блоков разбиения π_{TB}	$\mu(TB)$	Точность классификации, %
Исходное разбиение π_{TB}	$\pi_{TB} = (4, 154, 154)$	—	—
Вариант 1: $g_{Av} = M_{Av}$	$\hat{\pi}_{TB} = (0, 154, 154)$	0,6666	98,7
Вариант 2: $g_{Av} = M_{Av}/ Z _A$			
Вариант 3: $g_{Av} = M_{Av}/ Z _A C_v $ и выполнено преобразование (1)	$\hat{\pi}_{TB} = (4, 128, 128)$	0,8874	83,3

зом, ОВ и ТВ содержали по 312 наблюдений (последнее наблюдение не использовалось), причем в разбиении $\pi_{ОВ}$ класс C_1 имеет 44 элемента, а классы C_2 и C_3 — по 134 элемента. На ТВ в разбиении $\pi_{ТВ}$ класс C_1 имеет 4 элемента, а классы C_2 и C_3 — по 154 элемента, так что ТВ является существенно несбалансированной выборкой.

При применении к этой выборке Алгоритма были рассмотрены приведенные выше три варианта определения элементов g_{ij} матрицы весов M_Z . Качество Алгоритма для каждого из этих вариантов показано в табл. 2. В ней наглядно видно, как при невзвешенном голосовании заполняются «большие» классы разбиения π_{TB} , обеспечивая высокую точность классификации, и абсолютно «игнорируется» «малый» класс C_1 . Применение отображения (1) к строкам матрицы M_Z снижает несколько точность классификации из-за полного наполнения «малого» класса C_1 . Видно, как чувствительна мера $\mu(TB)$ к наполненности «малых» классов. Проблема наполнения «малых» классов при классификации требует более глубокого исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный простой алгоритм номинальной классификации по качественным признакам обладает рядом указанных выше особенностей, которые позволяют получить дополнительную информацию о процессе классификации, упрощают его применение и делают его доступным для широкого круга пользователей при решении практических задач. Тем не менее, основная тяжесть решаемых проблем с использованием качественных признаков сопряжена с выбором свойств, составляющих признаки классифицируемых объектов. Собственно классификация является заключительным этапом при формировании иерархической

структуры базисных понятий «объект» → «признак» → «значение признака» → «класс» → «классификация». Для формирования такой иерархии при решении исследуемой проблемы требуется привлечение хороших специалистов по интеллектуальному анализу данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Царьков С.А. Алгоритм ближайшего соседа. — URL: <https://basegroup.ru/community/articles/knn> (дата обращения 26.10.2016).
2. Thirumuruganathan S.A. Detailed Introduction to K-Nearest Neighbor (KNN) Algorithm / May 17, 2010. — URL: <http://saravananthirumuruganathan.wordpress.com/2010/05/17/a-detailed-introduction-to-k-nearest-neighbor-knn-algorithm/> (дата обращения 26.10.2016).
3. Dudani S.A. The Distance-Weighted k-Nearest-Neighbor Rule. Syst. Man Cybern // IEEE Trans. — 1976. — Vol. 6, N 4. — P. 325–327. — URL: [refhub.elsevier.com/S0031-3203\(14\)00282-9/sbref14](http://refhub.elsevier.com/S0031-3203(14)00282-9/sbref14) (дата обращения 26.10.2016).
4. Gou J., Xiong T., Kuang Y. A Novel Weighted Voting for K-Nearest Neighbor Rule // J. Comput. — 2011. — Vol. 6, N 5. — P. 833–840. — URL: https://www.researchgate.net/publication/220405196_A_ (дата обращения 26.10.2016).
5. Zavred J. An Empirical Re-examination of Weighted Voting for KNN. — URL: citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.36.573 (дата обращения 26.10.2016).
6. Kira K., Rendell L.A. The Feature Selection Problem: Traditional Methods and New Algorithm. — Proc. AAAI-1992. — URL: www.aaai.org/Papers/AAAI/1992/AAAI92-020.pdf (дата обращения 26.10.2016).
7. Kohavi R., Quinlan R. Decision Tree Discovery. — URL: ai.stanford.edu/~ronnyk/treesHB.pdf (дата обращения 26.10.2016).
8. Ratanamahatana C., Gunopulos D. Scaling up the Naive Bayesian Classifier: Using Decision Trees for Feature Selection — URL: www.cs.ucr.edu/~ratana/DCAP02.pdf (дата обращения 26.10.2016).
9. Jiang Su J., Zhang H. A Fast Decision Tree Learning Algorithm. — URL: www.cs.unb.ca/~hZhang/publications/AAAI06.pdf (дата обращения 26.10.2016).
10. Ibrahim P.S., Chandran K.R., Kanthasamy C.J.K. LACI: LaZy Associative Classification Using Information Gain // IACSIT Int. J. of Engineering and Technology. — 2012. — Vol. 4, N 1. — URL: www.ijetch.org/papers/309-T828.pdf (дата обращения 26.10.2016).
11. Association Analysis: Basic Concepts and Algorithms. — URL: www.users.cs.umn.edu/~kumar/dmbook/ch6.pdf (дата обращения 26.10.2016).



12. *Shekhawat P.B., Dhande S.S.* A Classification Technique using Associative Classification // Int. Journal of Computer Applications. — 2011. — Vol. 20. — N 5. — URL: www.ijcaonline.org/volume20/number5/pxc3873268.pdf (дата обращения 26.10.2016).
13. *Shfna T.T., Jayasudha J.S.* A Survey of Different Associative Algorithms // Asian Journal of Computer Science and Information Technology. — 2013. — Vol. 3, N 6. — P. 88–93. — URL: citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.183.1158 (дата обращения 26.10.2016).
14. *Bal M.* Rough Sets Theory as Symbolic Data Mining Method: An Application on Complete Decision Table // Inf. Sci. Lett. 2013. — Vol. 2, N 1. — P. 35–47. — URL: www.natural-spublishing.com/files/published/92srlr5h... (дата обращения 26.10.2016).
15. *Slowinski R., Greco S., Matarazzo B.* Rough Set and Rule-based Multicriteria Decision Aiding. — URL: www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S... (дата обращения 26.10.2016).
16. *Yao Y.* Three-Way Decision: An Interpretation of Rules in Rough Set Theory. — URL: www2.cs.uregina.ca/~yyao/PAPERS/rskt2009.pdf (дата обращения 26.10.2016).
17. *Grzymala-Busse J.W.* A Comparison of Three Strategies to Rule Induction from Data with Numerical Attributes // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. — March 2003. — Vol. 82, iss. 4. — P. 132–140. — URL: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1571066104... (дата обращения 26.10.2016).
18. *Filho A.T.B.* A Novel Approach Based on Multiple Criteria Decision Aiding Methods to Cope with Classification Problems. — URL: www.sapili.org/livros/en/cp136471.pdf (дата обращения 26.10.2016).
19. *Ряа Б.* Проблемы и методы принятия решений в задачах с многими целевыми функциями. — Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976. — С. 20–57.
20. *Eveyeva I.* Solving Classification Problems with Multicriteria Decision Aiding Approaches. — URL: jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/... (дата обращения 26.10.2016).
21. *Измерительные шкалы.* — URL: www.e-educ.ru/tsisa20.html. (дата обращения 26.10.2016).
22. *Machine Learning Repository.* — URL: <http://archive.ics.uci.edu/ml/> (дата обращения 26.10.2016).
23. *Gou J., Du L., Zhang Y, Xiong T.* A New distance-weighted k-nearest neighbor classifier // Journal Inf. Comput. Sci. — 2012. — Vol. 9, N 6. — P. 1429–1436.
24. *Geler Z., Kurbalija V., Radovanović M., Ivanovic M.* Comparison of different weighting schemes for the kNN classifier on time-series data. — URL: in print. (DOI: 10.1007/s10115-015-0881-0) link.springer.com/article/10.1007/s10115-015-0881-0 (дата обращения 26.10.2016).
25. *Kononenko I.* Estimating attributes: analysis and extensions of Relief — URL: link.springer.com/.../10.1007%2F3-540-57868... (дата обращения 26.10.2016).
26. *Robnik-Sikonja M., Kononenko I.* Theoretical and Empirical Analysis of ReliefF and RReliefF. — URL: lkm.fri.uni-lj.si/rmarko/papers/robnik03-mlj.pdf (дата обращения 26.10.2016).
27. *Scherf M., Brauer W.* Feature Selection by Means of a Feature Weighting Approach. — URL: citeseer.ist.psu.edu/viewdoc/summary? (дата обращения 26.10.2016) doi=10.1.1.43.1821.
28. *Guvener H.A., Akkus A.* Weighted k-Nearest Neighbor Classification on Feature Projections. — URL: www.cs.bilkent.edu.tr/tech-reports/1997/BU-CEIS-9719.pdf (дата обращения 26.10.2016).
29. *Lei J.* Classification with Confidence // Biometrika — 2014. — P. 1–5. — URL: www.stat.cmu.edu/~jinglei/conf_class_R2.pdf (дата обращения 26.10.2016).
30. *Zaragoza H., d'Alché-Buc F.* Confidence Measures for Neural Network Classifiers // Proc. 7-tgh Conf. IPMU. 1998. — URL: research.microsoft.com/pubs/66924/hugoZ_ipmu98.pdf (дата обращения 26.10.2016).
31. *Воронцов К.В.* Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов // Математические вопросы кибернетики / под ред. О.Б. Лупанова. — М., 2004. — Вып. 13. — С. 5–36.
32. *López V., Fernandez A., Garcia S., et al.* An Insight into Classification with Imbalanced Data: Empirical Results and Current Trends on Using Data Intrinsic Characteristics // Information Sciences. — 2013. — N 250. — P. 113–141. — URL: sci2s.ugr.es/imbalance (дата обращения 26.10.2016).
33. *Jurman G., Riccadonna S., Furlanello C.* A Comparison of MCC and CEN Error Measures in Multi-Class Prediction // PLoS One. — 2012. — Vol. 7. — N 8. — URL: www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3414515/ (дата обращения 26.10.2016).
34. *Krippendorff K.* Computing Krippendorff's Alpha-Reliability. — URL: www.asc.upenn.edu/usr/krippendorff/mwebreliability4.pdf (дата обращения 26.10.2016).

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.А. Дорофеевом.

Корноушенко Евгений Константинович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ekorno@mail.ru.



Содержание сборника «Управление большими системами», 2016, вып. 64

- Пьяных А.И.** Многошаговая модель биржевых торгов с элементами переговоров и счетным множеством состояний
- Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А.** и др. Анализ и прогнозирование характеристик безопасности авиационных транспортных систем на основе уравнений системной динамики
- Емельянова Ю.П.** Стабилизация нелинейных систем Форназини — Маркезини
- Сазонов В.В., Скобелев П.О., Лада А.Н.** и др. Применение мультиагентных технологий в транспортной задаче с временными окнами и несколькими пунктами погрузки
- Мелентьев В.А.** «Реберное» масштабирование гиперкубических вычислительных систем
- Алгазин Г.И., Алгазина Д.Г.** Информационное равновесие в модели динамики коллективного поведения на конкурентном рынке
- Федянин Д.Н., Чхартисвили А.Г.** Консенсус в социальной сети со сложными узлами
- Чернявский А.Л., Дорофеев Ю.А., Мандель А.С.** и др. Анализ процесса госпитализации пациентов в крупной клинике методами коллективной многовариантной экспертизы

Тексты статей в свободном доступе на сайте <http://ubs.mtas.ru/>

ПОИСК РАВНОВЕСИЯ КУРНО НА РЫНКЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ В УСЛОВИЯХ КОНКУРЕНТНОГО ПОВЕДЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА

В.А. Стенников, А.В. Пеньковский, О.В. Хамисов

Рассмотрена организационная модель «Единый закупщик» на рынке тепловой энергии. Разработана математическая модель, в которой на основе подхода Курно определяется оптимальное распределение тепловой нагрузки между источниками тепловой энергии, соответствующее равновесию Нэша. Отмечено, что математическая модель позволяет учитывать затраты на производство и транспорт тепловой энергии, а также физико-технические свойства теплоснабжающих систем. С помощью разработанной модели исследована теплоснабжающая система с тремя источниками тепла.

Ключевые слова: теплоснабжающая система, рынок тепловой энергии, модель «Единый закупщик», оптимизация, равновесие Курно — Нэша.

ВВЕДЕНИЕ

Переход к новым отношениям в экономике страны неизбежно связан с соответствующим реформированием организации управления теплоснабжением потребителей. Появление различных собственников в этом секторе привело к формированию новых экономических отношений между производителями, поставщиками и потребителями тепловой энергии (ТЭ) и созданию рынка тепла.

Основная особенность рынка тепловой энергии, по сравнению с другими энергетическими рынками (электроэнергетическими, газовыми, нефтяными и др.), состоит в локальном характере производства и потребления тепловой энергии, определяемом высокой стоимостью ее транспорта и значительными тепловыми потерями в тепловых сетях (ТС), делающими нецелесообразной передачу тепла на большие расстояния.

В настоящее время на рынке тепловой энергии появилось множество энергоснабжающих организаций, принадлежащих различным собственникам, среди них: муниципальные теплоэнергетические предприятия, теплоснабжающие предприятия территориальных генерирующих компаний, энергетические компании промышленных предприятий и др. Каждый из собственников имеет свои интересы и стремится получить наибольшую выгоду от своей деятельности, поэтому при решении задачи управления развитием теплоснабжающих систем

(ТСС) в сложившихся рыночных условиях требуются новые подходы к их моделированию, расчету и оптимизации, которые должны быть направлены на формирование стимулов у теплоснабжающих организаций, обеспечивать удовлетворение заданного спроса на тепловую энергию со стороны потребителей. В этих условиях особую актуальность приобретает проблема преобразования ТСС в условиях множества интересов в целях повышения их эффективности, надежности и конкурентоспособности. Наряду с совершенствованием существующих методов оптимизации ТСС необходимы разработка и применение новых подходов, позволяющих учитывать интересы всех участников рынка тепловой энергии.

1. ОРГАНИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОНКУРЕНТНОГО РЫНКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Организационная модель рынка тепловой энергии формируется на базе существующих ТСС. Как и во многих других сферах хозяйственной деятельности, одной из возможных форм организации рынка в теплоснабжении может быть постепенная ориентация на создание конкурентных отношений. Конкурентная модель рынка тепловой энергии может складываться в тех городах, теплоснабжение которых осуществляется от нескольких источников тепла (ИТ), принадлежащих различным собственникам. Тепловые сети, обеспечивающие совместную работу источников, представляют со-

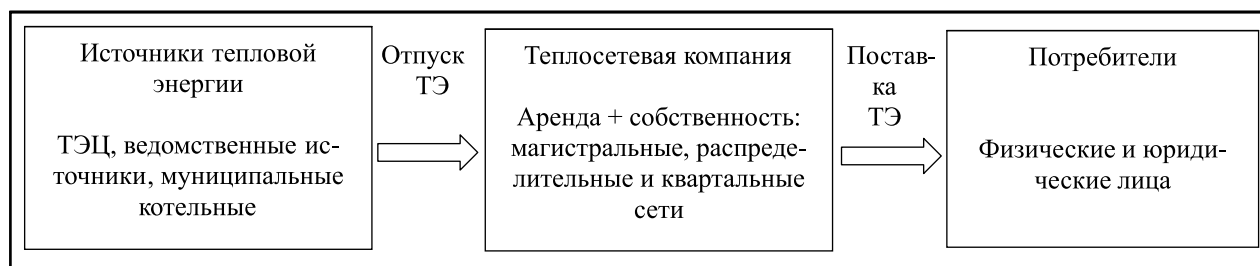


Рис. 1. Модель конкурентного рынка тепловой энергии

бой самостоятельную сферу деятельности, которая организационно отделена от генерации тепла и объединяются в единую теплосетевую компанию. В смысле микроэкономики такая форма организации рынка тепловой энергии относится к олигополии [1]. Теоретическому анализу и математическому моделированию олигополистических рынков посвящено достаточно много работ как в зарубежной литературе [2, 3], так и в отечественной [4, 5], в которых рассматриваются методы поиска равновесия на примере линейных функций спроса и затрат. Однако наибольший интерес вызывают работы по математическому моделированию олигопольных рынков с нелинейными характеристиками спроса и затрат [6], позволяющих более точно учесть динамику реальных процессов формирования затрат производителей товара (услуг).

За последнее десятилетие в зарубежной литературе появился ряд прикладных работ, связанных с применением моделей олигополии для анализа различных энергетических систем. Однако в отечественной литературе практически не встречаются примеры применения моделей олигополии для решения задач функционирования и развития ТСС в условиях рынка, но они успешно используются в электроэнергетике [7–12], нефтегазовом комплексе [13, 14], а также в системах водоснабжения городов [15].

Конкуренция на рынке тепловой энергии — важный элемент рыночной экономики, поскольку она способствует росту эффективности производства ТЭ, улучшению ее качества и, как следствие, снижению ее цены, что может благоприятно отразиться на развитии централизованного теплоснабжения.

Конкуренция между ИТ возникает в связи либо с избыточностью их суммарной мощности по сравнению с суммарным спросом на ТЭ (конкуренция предложения), либо с конкурентной угрозой строительства экономически более эффективных новых ИТ (конкурентная угроза), либо с возможностью ухода потребителей из ТСС (конкуренция спроса) на альтернативный способ теплоснабжения (децентрализованный источник) [16].

Как и в любой другой энергетической отрасли (электроэнергетической, нефтяной, газовой и др.) взаимоотношения между производителями и потребителями тепловой энергии строятся на поиске равенства совокупного спроса (для потребителей) и предложения (для ИТ) тепловой энергии.

Укрупненно, реализация модели конкуренции между ИТ на рынке тепловой энергии может быть представлена в виде схемы, приведенной на рис. 1. Предпосылки, необходимые для формирования такой модели, должны учитывать:

- наличие двух и более ИТ, принадлежащих различным собственникам;
- объединение тепловых сетей (магистральных, распределительных и др.) различных форм собственности (частной, муниципальной и пр.) в «Единую теплосетевую компанию»;
- наличие избытков тепловой мощности ИТ.

Взаимоотношения участников рынка выстраиваются по определенной схеме. Теплосетевая компания, будучи регулируемой естественной монополией на рынке тепла и основываясь на результатах прогнозов спроса, осуществляет поставку тепловой энергии потребителям по тарифу, определяемому как сумма тарифа производства тепловой энергии ИТ и тарифа ее транспорта от ИТ до потребителей. При этом цена закупки ТЭ не регулируется в связи с возможностью рыночного выбора поставщика (ИТ) теплосетевой компанией. Каждый ИТ производит такое количество тепловой энергии, которое максимизирует получаемую им прибыль при условии, что ИТ в совокупности покрывают заданный потребителями спрос на ТЭ и удовлетворяют желанию потребителей платить за этот спрос, а теплосетевая компания минимизирует свои сетевые затраты с учетом физико-технических ограничений и оптимальных потоков теплоносителя в ТС и определяет тариф на транспорт ТЭ на уровне средних суммарных затрат на тепловые сети.

Организационную структуру управления такого типа рынка, как правило, называют моделью «Единый закупщик» [16, 17]. В России и в мире эта

модель широко применяется при моделировании рынка электроэнергии [7, 18].

Среди наиболее распространенных подходов для анализа и прогнозирования возможных ситуаций при решении задач функционирования систем в условиях олигопольного рынка можно выделить микроэкономическую модель Курно [19]. Это одна из распространенных моделей, применяемых для анализа функционирования и развития различных рынков товаров (услуг), в том числе адекватных тепловому и электроэнергетическому рынкам. В отличие от краткосрочного прогнозирования, когда ИТ могут манипулировать ценами, среднесрочное и долгосрочное прогнозирование характеризуется тем, что в перспективе ситуация на рынке определяется имеющимися мощностями ИТ, следовательно, объемами ТЭ, которые ИТ могут поставить на рынок. В этом случае влияние на цену происходит опосредованно, через объемы, а именно такой подход как раз и лежит в основе модели Курно.

Как правило, модель Курно учитывает лишь технологические особенности производителей, связанные с затратами на производство товара или услуг. Особенность предлагаемой математической модели заключается в том, что в ней совместно рассматриваются источники тепловой энергии и тепловая сеть с характерными для них физико-техническими и экономическими свойствами.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЫНКА ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Описывается поведение трех агрегированных участников ТСС: источники тепла, теплосетевая компания и потребители. На рынке тепловой энергии основная задача состоит в формировании баланса между спросом и предложением на ТЭ, соответствующего их равновесию. Найти это равновесие достаточно сложно, необходима математическая модель, которая бы позволяла провести расчет основных параметров этого равновесия: объемы производства и потребление тепловой энергии, затраты на производство ТЭ, затраты на транспортировку тепла, прибыль от продажи ТЭ источниками, установившаяся цена на ТЭ для потребителей и др.

Теплоснабжающая система с множеством источников и тепловыми сетями моделируется гидравлической цепью, состоящей из m узлов и n ветвей [20]. Она представляет собой совокупность упорядоченных множеств: узлов $J = \{j : j = 1, \dots, m\}$; источников $J_{\text{ИТ}} \subset J$; потребителей $J_{\text{П}} \subset J$; узлов разветвления, в которых нет ни источников, ни потребителей $J_0 \subset J$; ветвей (участков) $I = \{i : i = 1, \dots, n\}$, отображающих заданные попарные связи между узлами. Структура гидравлической цепи описыва-

ется полной матрицей соединений (инцидентий) A , число строк в которой совпадает с числом узлов, а число столбцов с числом ветвей.

Моделирование такой системы осуществляется с определенным временным интервалом, начинающимся с начального момента времени τ_0 (соответствующего расчетной тепловой нагрузке) и заканчивающимся конечным (расчетным) моментом времени T (например, календарным числом часов в году — 8760).

2.1. Математическая модель поведения источников тепла

При моделировании поведения источников в модели «Единый закупщик» предполагается, что в каждый момент времени $\tau = \tau_0, \dots, T$ они оперируют своими объемами производства тепловой энергии $Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}$, $j \in J_{\text{ИТ}}$ и принимают свои решения, исходя из цены производства тепла $w_{\tau}^{\text{ИТ}}$, ограничений на объемы производства и затрат, связанных с производством ТЭ.

Затраты ИТ на производство тепловой энергии для любого момента времени τ можно представить в виде функциональной зависимости от количества вырабатываемого ими тепла, которая включает в себя переменные (топливные) и постоянные (на обслуживание) затраты. Вывод функции затрат — задача достаточно сложная, так как каждый тип оборудования, имеющийся на ИТ, имеет свои характеристики и описывается отдельными выражениями. В качестве исходной информации принимаются утвержденные нормативные характеристики основного оборудования, представленные его изготовителями (или полученные в результате испытаний). Полученные расчетным путем характеристики корректируются с учетом влияния различных внутренних и внешних факторов (фактическое давление пара в котле, вид и стоимость используемого топлива, параметры теплоносителя, температура наружного воздуха и др.).

Имеющийся опыт обработки данных по ИТ показал, что наилучшее соответствие функции затрат их реальным значениям может быть получено при задании ее в виде полинома второго порядка [21—23]:

$$Z_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) = \alpha_j (Q_{j\tau}^{\text{ИТ}})^2 + \beta_j Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} + \gamma_j,$$

$$\alpha_j > 0, \quad \beta_j > 0, \quad \gamma_j > 0, \quad j \in J_{\text{ИТ}}, \quad \tau = \tau_0, \dots, T,$$

где α_j , руб./(Гкал/ч)², β_j , руб./(Гкал/ч), γ_j , руб. — коэффициенты аппроксимации затратной характеристики ИТ.

В силу положительности коэффициентов α_j , β_j и γ_j функция затрат представляет собой сильно вы-

пуклую, монотонно возрастающую функцию, принимающую положительные значения при $Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} \geq 0$.

В условиях рынка поведение j -го ИТ определяется выгодой (объемами прибыли), получаемой от производства ТЭ в каждый момент времени τ . Пусть $Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}$ — планируемый производителем j объем производства тепловой энергии, тогда его прибыль составит

$$P_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) = w_{\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{\tau}^{\text{ИТ}})Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - Z_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}), \text{ руб.},$$

где $Q_{\tau}^{\text{ИТ}} = (Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} : j \in J_{\text{ИТ}})$, $w_{\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{\tau}^{\text{ИТ}})$ — цена на тепловую энергию, которая зависит от суммарного объема производства тепла всеми производителями.

Оптимальные значения объемов производства тепловой энергии ИТ определяются в процессе решения задачи и соответствуют получению максимальной суммарной прибыли за весь временной интервал $[\tau_0, T]$ для каждого j -го ИТ с учетом ограничений на ее объемы производства ТЭ:

$$\sum_{\tau=\tau_0}^T P_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) = \sum_{\tau=\tau_0}^T w_{\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{\tau}^{\text{ИТ}})Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - \sum_{\tau=\tau_0}^T Z_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$Q_{j_min}^{\text{ИТ}} \leq Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} \leq Q_{j_max}^{\text{ИТ}}, \quad \tau = \tau_0, \dots, T, \quad (2)$$

где $Q_{j_min}^{\text{ИТ}}$ и $Q_{j_max}^{\text{ИТ}}$ — минимальный и максимальный уровни производительности j -го ИТ, Гкал/ч.

Из выражений (1) и (2) нетрудно заметить, что рассматриваемая структура источников тепла $j \in J_{\text{ИТ}}$ адекватно описывается моделью Курно, а решение задачи в данном случае будет соответствовать равновесию по Нэшу [19].

2.2. Математическая модель потребителей тепловой энергии

Множество потребителей J_{Π} на рынке тепловой энергии по характеру нагрузки укрупненно можно представить в виде объединения двух множеств: $J_{\Pi} = J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}} \cup J_{\Pi}^{\text{ПП}}$, где $J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}}$ — потребители жилищно-коммунального хозяйства, $J_{\Pi}^{\text{ПП}}$ — потребители промышленного сектора. Суммарный спрос потребителей в узле $j \in J_{\Pi}$ обозначим через $Q_{j\tau}^{\Pi}$. Спрос потребителей ЖКХ на тепловую энергию $Q_{j\tau}^{\Pi}$, $j \in J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}}$, будем обозначать как $Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}}$, а

спрос потребителей промышленного сектора $Q_{j\tau}^{\Pi}$, $j \in J_{\Pi}^{\text{ПП}}$, через $Q_{j\tau}^{\text{ПП}}$, тогда

$$Q_{j\tau}^{\Pi} = Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} + Q_{j\tau}^{\text{ПП}}, \quad j \in J_{\Pi}^{\text{ПП}} \cap J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}},$$

$$Q_{j\tau}^{\Pi} = Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}}, \quad j \in J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}} \setminus J_{\Pi}^{\text{ПП}},$$

$$Q_{j\tau}^{\Pi} = Q_{j\tau}^{\text{ПП}}, \quad j \in J_{\Pi}^{\text{ПП}} \setminus J_{\Pi}^{\text{ЖКХ}}.$$

Спрос $Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}}$ определяется по графику продолжительности тепловой нагрузки. Конфигурация этого графика достаточно хорошо описывается уравнением Россандера, согласно которому тепловая нагрузка в каждый момент времени τ определяется по формуле [24]

$$Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} = \left[1 - (1-r)(\tau/\tau_{\text{от}})^{\frac{g-r}{1-g}} \right] Q_j^{\text{оп}} + Q_j^{\text{ГВС}}, \text{ Гкал/ч},$$

$$r = (1-\theta) \frac{t_{\text{вр}} - t_{\text{но}}}{t_{\text{вр}} - t_{\text{нр}}},$$

$$g = (1-\theta) \frac{t_{\text{вр}} - t_{\text{нс}}}{t_{\text{вр}} - t_{\text{нр}}},$$

где $Q_j^{\text{оп}}$ — расчетная тепловая нагрузка на отопление, Гкал/ч; $Q_j^{\text{ГВС}}$ — расчетная тепловая нагрузка горячего водоснабжения, Гкал/ч; r и g — коэффициенты неравномерности графика тепловой нагрузки; θ — доля нагрузки горячего водоснабжения; $t_{\text{вр}}$ — расчетная температура воздуха внутри помещения, °C; $t_{\text{нр}}$, $t_{\text{но}}$ и $t_{\text{нс}}$ — температуры наружного воздуха: расчетная, соответствующая началу отопительного периода (+8 °C) и средняя за отопительный период °C; $\tau_{\text{от}}$ — продолжительность отопительного периода, ч.

Спрос $Q_{j\tau}^{\text{ПП}}$ моделируется на основе реальных расчетов и может быть представлен в виде линейной зависимости [25]:

$$Q_{j\tau}^{\text{ПП}} = \xi_j - \vartheta_j w_{\tau}, \text{ Гкал/ч}, \quad (3)$$

где $\xi_j > 0$, $\vartheta_j > 0$ — постоянные, полученные в процессе аппроксимации фактических данных объема покупки тепловой энергии промышленным предприятием от ее цены; w_{τ} — покупная цена, руб./Гкал.

Волатильность спроса на тепло относится к основной рыночной проблеме теплоэнергии. В связи с этим предлагается рассматривать взаимодействие производителей и потребителей в течение каждого часа из заданного временного периода. Такое дискретное временное моделирование представляет значительный практический интерес, поскольку

ку позволяет учитывать как дневные, так и сезонные факторы спроса на тепловую энергию, которые могут существенно влиять на решение задачи по объемам спроса и производства тепловой энергии для каждого ИТ, а значит, и на размер получаемой ими прибыли.

2.3. Математическая модель тепловой сети

Математические модели тепловых сетей в непрерывной (задачи функционирования) и дискретной (задачи развития) постановках достаточно хорошо исследованы [20, 24, 26]. Для математического описания задачи поиска минимальных затрат теплосетевой компанией воспользуемся следующей экстремальной задачей в непрерывной постановке [20]:

$$Z_{\tau}^{\text{TC}}(x_{\tau}) = \sum_{i=1}^n Z_{i\tau}^{\text{TC}}(x_{i\tau}) = F_1 + F_2 \sum_{i=1}^n x_{i\tau}^2 |x_{i\tau}| s_i \rightarrow \min, \quad (4)$$

$$A_j x_{\tau} = Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - Q_{j\tau}^{\text{П}}, \quad j \in J_{\text{ИТ}} \cap J_{\text{П}}, \quad (5)$$

$$A_j x_{\tau} = Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}, \quad j \in J_{\text{ИТ}} \setminus J_{\text{П}}, \quad (6)$$

$$A_j x_{\tau} = -Q_{j\tau}^{\text{П}}, \quad j \in J_{\text{П}} \setminus J_{\text{ИТ}}, \quad (7)$$

$$A_j x_{\tau} = 0, \quad j \in J_0, \quad (8)$$

где $x_{\tau} = (x_{1\tau}, \dots, x_{n\tau})$, $x_{i\tau}$ — расход теплоносителя на i -м участке тепловой сети в момент времени τ , т/ч;

$F_1 = f_c \sum_{i=1}^n [a_i + b_i \chi_i^{0,19u_i} s_i^{-0,19u_i} l_i^{0,19u_i}] l_i / n_{\tau}$ — условно-постоянные затраты, руб.; $f_c = 0,075$ — доля условно-постоянных и эксплуатационных издержек

по тепловой сети; a_i , руб./м; b_i , руб./м ^{u_i+1} и u_i (безразмерная величина) коэффициенты, которые получаются в результате аппроксимации реальных (табличных) значений стоимости трубопроводов различных диаметров; χ_i — коэффициент, зависящий от шероховатости трубопровода (безразмерная величина); s_i — коэффициент гидравлического сопротивления i -й ветви, м³·ч²/т²; l_i — длина i -го участка сети, м; n_{τ} — число часов работы насосной установки, ч/год; $F_2 = C_{\text{ЭЭ}}/367,2\eta$ — коэффициент условно переменных затрат в ТС, руб.; $C_{\text{ЭЭ}}$ — цена электроэнергии, руб./кВт·ч; η — коэффициент полезного действия насосной установки.

Поскольку каждая функция $Z_{i\tau}^{\text{TC}}(x_{i\tau})$ является строго выпуклой и коэрцитивной, т. е.

$$\lim_{|x_{i\tau}| \rightarrow \infty} Z_{i\tau}^{\text{TC}}(x_{i\tau}) = \infty,$$

то, следовательно, и целевая функция $Z_{\tau}^{\text{TC}}(x_{\tau})$ суммарных затрат в ТС является строго выпуклой и коэрцитивной. В силу альтернативы Фредгольма система уравнений (5)—(8) является разрешимой тогда и только тогда, когда для любого момента времени τ выполняется равенство:

$$\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - \sum_{j \in J_{\text{П}}} Q_{j\tau}^{\text{П}} = 0, \quad (9)$$

т. е. когда спрос равен предложению. Строго выпуклая коэрцитивная функция на замкнутом выпуклом подмножестве конечномерного пространства достигает своего минимума в единственной точке. Следовательно, задача поиска минимальных затрат на тепловые сети (4)—(8), для которой выполняется условие материального баланса (9) имеет единственное решение.

Будем считать вектор $Q_{\tau}^{\text{ИТ}}$ внешним параметром в задаче оптимизации затрат в тепловые сети (4)—(8), т. е. будем ее решать при разных векторах $Q_{\tau}^{\text{ИТ}}$. Если выполнено условие материального баланса (9), то в силу сказанного, однозначно определяются вектор оптимального потокораспределения $x_{\tau}^*(Q_{\tau}^{\text{ИТ}})$ и минимальные затраты в ТС $Z_{\tau}^{\text{TC}}(x_{\tau}^*(Q_{\tau}^{\text{ИТ}}))$. Введем в рассмотрение неявную функцию оптимального значения сетевых затрат $\varphi(Q_{\tau}^{\text{ИТ}}) = Z_{\tau}^{\text{TC}}(x_{\tau}^*(Q_{\tau}^{\text{ИТ}}))$. Если условие материального баланса не выполняется, то полагаем $\varphi(Q_{\tau}^{\text{ИТ}}) = +\infty$. Цену транспорта тепловой энергии от ИТ до потребителей определим по формуле

$$w_{\tau}^{\text{TC}}(Q_{\tau}^{\text{ИТ}}) = \varphi(Q_{\tau}^{\text{ИТ}}) / \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}, \text{ руб./Гкал.}$$

2.4. Математическое моделирование конкурентного рынка тепловой энергии

Содержательный смысл разрабатываемой математической модели рынка ТЭ состоит в том, чтобы при заданном спросе на тепло со стороны потребителей определить оптимальные условия в соответствии с равновесием спроса и предложения ТЭ, при которых ИТ производили бы такие объемы ТЭ, которые обеспечивали бы удовлетворение спроса на ТЭ со стороны потребителей и получение ими максимальной прибыли, при этом затраты на ТС имели бы минимальные значения.

Цена для потребителей w_{τ} , см. формулу (3), представляет собой сумму:

$$w_{\tau} = w_{\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{\tau}^{\text{ИТ}}) + w_{\tau}^{\text{TC}}(Q_{\tau}^{\text{ИТ}}). \quad (10)$$



Из условия баланса тепла (9) в ТСС и соотношения (3) получаем

$$\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} = \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ЖКХ}}} Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} Q_{j\tau}^{\text{ПП}} = \\ = \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ЖКХ}}} Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} (\xi_j - \vartheta_j w_\tau), \quad (11)$$

откуда

$$w_\tau = \frac{1}{\sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} \vartheta_j} \left(\sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ЖКХ}}} Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} \xi_j - \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} \right), \quad \tau = \tau_0, \dots, T. \quad (12)$$

Далее, из соотношений (10) и (12) получаем выражение цены производства тепловой энергии ИТ:

$$w_\tau^{\text{ИТ}}(Q_\tau^{\text{ИТ}}) = \frac{1}{\sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} \vartheta_j} \left(\sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ЖКХ}}} Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} \xi_j - \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} \right) - \frac{\varphi(Q_\tau^{\text{ИТ}})}{\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}}, \quad \tau = \tau_0, \dots, T. \quad (13)$$

Выражение (13) описывает влияние всех ИТ на цену, по которой они продают тепловую энергию. С математической точки зрения цена для источников представляет собой неявную функцию вектора объемов производства тепловой энергии $Q_\tau^{\text{ИТ}} = (Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} : j \in J_{\text{ИТ}})$. Неявный характер зависимости порождается присутствием в выражении (13) функции оптимального значения сетевых затрат $\varphi(Q_\tau^{\text{ИТ}})$, т. е. для того, чтобы вычислить цену генерации тепла при заданном векторе $Q_\tau^{\text{ИТ}}$, необходимо сначала решить задачу (4)–(8), а затем воспользоваться формулой (13). Отметим, что при таком подходе задача (4)–(8) представляется разрешимой.

В результате выполненных преобразований модель поиска равновесия спроса и предложения на конкурентном рынке тепловой энергии, примет вид:

$$\sum_{\tau=\tau_0}^T P_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) = \sum_{\tau=\tau_0}^T w_\tau^{\text{ИТ}}(Q_\tau^{\text{ИТ}}) Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} - \\ - \sum_{\tau=\tau_0}^T Z_{j\tau}^{\text{ИТ}}(Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}) \rightarrow \max, \quad j \in J_{\text{ИТ}}, \quad (14)$$

при условии

$$Q_{j_min}^{\text{ИТ}} \leq Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} \leq Q_{j_max}^{\text{ИТ}}, \\ \tau = \tau_0, \dots, T, \quad j \in J_{\text{ИТ}}, \quad (15)$$

$$w_\tau^{\text{ИТ}}(Q_\tau^{\text{ИТ}}) = \frac{1}{\sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} \vartheta_j} \left(\sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ЖКХ}}} Q_{j\tau}^{\text{ЖКХ}} + \sum_{j \in J_{\text{П}}^{\text{ПП}}} \xi_j - \sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}} \right) - \frac{\varphi(Q_\tau^{\text{ИТ}})}{\sum_{j \in J_{\text{ИТ}}} Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}}, \quad \tau = \tau_0, \dots, T, \quad (16)$$

где $\varphi(Q_\tau^{\text{ИТ}})$ — решение задачи (4)–(8).

Описанная модель включает в себя набор условий и ограничений (14), (15), отражающих поведение всех ИТ, связь (16) между ценой $w_\tau^{\text{ИТ}}(Q_\tau^{\text{ИТ}})$ и суммарными объемами производства ТЭ на рынке. Решение, удовлетворяющее всем соотношениям, и будет равновесием, поскольку учитывает интересы всех участников рынка. Влияние объемов производства ТЭ источника на цену $w_\tau(Q_\tau^{\text{ИТ}})$ отражено в балансовом ограничении (11). Они в явном виде не входят в модель (14), (16), однако фигурируют при поиске решения задачи (4)–(8). В число переменных модели входят: вектор объемов тепловой энергии, произведенной ИТ, $Q_\tau^{\text{ИТ}}$; спрос промышленных потребителей $Q_\tau^{\text{ПП}}$; вектор потоков тепловой энергии по участкам сети x_τ ; цена потребителей тепловой энергии w_τ ; цена производителей тепловой энергии $w_\tau^{\text{ИТ}}$. Нахождение решения, удовлетворяющего всем перечисленным требованиям и составляет основное содержание задачи нахождения равновесия.

Методика поиска равновесного решения основана на игровом итерационном процессе (процесс нащупывания по Курно [19]) и заключается в пошаговой последовательности.

Шаг 1. Задается расчетный момент времени $\tau = \tau_0$.

Шаг 2. Рассчитываются нагрузки потребителей ЖКХ ($Q_\tau^{\text{ЖКХ}}$) по уравнению Россандера.

Шаг 3. Присваивается $e = 1$ (цикл Курно — Нэша).

Шаг 4. Задается вектор начального приближения объемов производства тепловой энергии источниками $Q_\tau^0 = (Q_{1,\tau}^0, Q_{2,\tau}^0, \dots, Q_{n,\tau}^0)$.

Шаг 5. Задаются значения прибылей источниками тепла $P_{j,0,\tau}^0 = -\infty$.

Шаг 6. Присваиваются $j = 1, k = 1$, где k — шаг в сторону возрастания функции прибыли (14).

Шаг 7. Вычисляется значение конечной цены тепловой энергии по формуле (12), в которую вместо $Q_{j\tau}^{\text{ИТ}}$ подставляется $Q_{j,\tau}^{e-1}$.

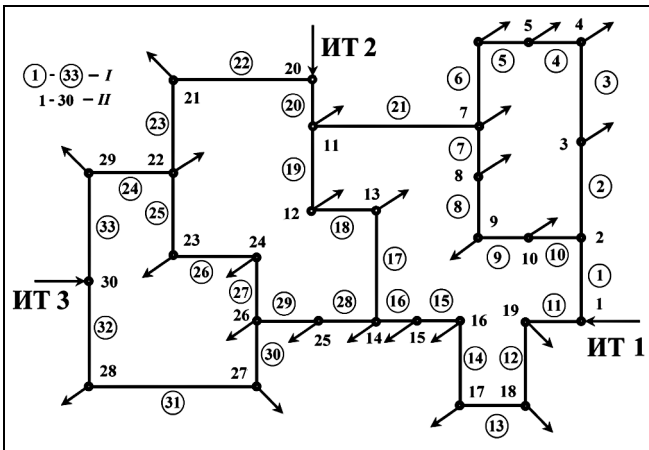


Рис. 2. Расчетная схема теплоснабжающей системы: *I* — номера участков тепловой сети; *II* — номера узлов тепловой сети

Шаг 8. Рассчитывается объем потребления тепловой энергии промышленными потребителями по уравнению (3).

Шаг 9. Рассчитывается потокораспределение в сети по выражениям (4)—(8) и соответствующие ему сетевые затраты.

Шаг 10. Определяется равновесная цена производства ТЭ источниками тепла по формуле (13).

Шаг 11. Рассчитывается прибыль j -го источника

$$\tilde{P}_{j,k,\tau}^e = w_{\tau}^{\text{ИТ}} Q_{j,\tau}^{e-1} - Z_{j,\tau}(Q_{j,\tau}^{e-1}).$$

Шаг 12. Если $\tilde{P}_{j,k,\tau}^{e-1} > \tilde{P}_{j,k-1,\tau}^{e-1}$, то $Q_{j,\tau}^e = Q_{j,\tau}^{e-1} + \Delta Q_j^e$, $k = k + 1$, и переход на шаг 7. Иначе $P_{j,\tau}^e = \tilde{P}_{j,k,\tau}^e$, $j = j + 1$, если $j < n$, переход на шаг 7.

Шаг 13. Проверка: если $|Q_{j,\tau}^e - Q_{j,\tau}^{e-1}| \leq \varepsilon$ для всех $j = 1, \dots, n$, то $\tau = \tau + 1$, переход на шаг 2, иначе $e = e + 1$, переход на шаг 6.

Полученные расчетные показатели суммируются по τ и затем определяется цена на ТЭ для потребителей за рассматриваемый период по формуле

$$\bar{w} = \sum_{\tau=\tau_0}^T w_{\tau} / (T - \tau_0), \text{ руб./Гкал.}$$

3. АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО РЫНКА С ПОМОЩЬЮ РАЗРАБОТАННОЙ МОДЕЛИ

Расчетная схема рассматриваемой теплоснабжающей системы представлена на рис. 2. Узлы 1, 20 и 30 соответствуют узлам-источникам тепловой энергии, узлы 3–10, 12–19 и 21–28 соответствуют потребителям ЖКХ, а узел 29 — промышленному потребителю. Все источники принадлежат различным собственникам, а их сум-

марная мощность избыточна, относительно подключенных тепловых нагрузок.

В расчете приняты следующие исходные данные.

- Функция затрат первого, второго и третьего источников тепловой энергии, руб.:

$$Z_1(Q_1) = 30247 + 890Q_1 + 0,025Q_1^2,$$

$$Z_{20}(Q_{20}) = 38007 + 810Q_{20} + 0,035Q_{20}^2,$$

$$Z_{30}(Q_{30}) = 33007 + 850Q_{30} + 0,03Q_{30}^2.$$

- Суммарная расчетная тепловая нагрузка потребителей ЖКХ равна 1520 Гкал/ч, а ее распределение по узлам системы представлено в табл. 1.
- Тепловая нагрузка промышленного потребителя, Гкал/ч: $Q_{29} = 37\,207,2 - 20,95w$.
- Ограничения на тепловую мощность источников, Гкал/ч: $0 \leq Q_1 \leq 800$, $0 \leq Q_{20} \leq 1100$, $0 \leq Q_{30} \leq 1400$.
- Коэффициенты в функции капитальных вложений в сеть, руб./м: $a = 6835$, $b = 63\,827$, $u = 1,45$ (безразмерная величина).
- Удельная стоимость электроэнергии, руб./кВт·ч: $C_{э} = 0,82$.
- Гидравлические сопротивления участков приведены в табл. 2.

Таблица 1

Тепловые нагрузки потребителей ЖКХ

Номер потребителя	Нагрузка отопления, Гкал/ч	Нагрузка горячего водоснабжения, Гкал/ч
3	56	14
4	40	10
5	56	14
6	80	20
7	48	12
8	36	9
9	64	16
10	40	10
12	56	14
13	72	18
14	16	4
15	32	8
16	48	12
17	64	16
18	16	4
19	24	6
21	32	8
22	48	12
23	80	20
24	64	16
25	60	15
26	48	12
27	56	14
28	80	20



- Коэффициент, зависящий от шероховатости трубопровода для всех участков, $\chi = 0,01277$ (при $k = 0,5$ мм).
- Расчетный период равен одному календарному году.
- Продолжительность отопительного периода, ч/год: 5760.
- Расчетная температура воздуха внутри помещения, °С: +20.
- Расчетная температура наружного воздуха, °С: –36.
- Температура, соответствующая началу отопительного периода, °С: +8.
- Средняя температура за отопительный период, °С: –8,9.
- Доля горячего водоснабжения: 0,2.
- КПД насосной установки: 0,8.

Технико-экономические показатели, полученные в процессе расчетов, по теплоисточникам, тепловой сети и потребителям для сформулирован-

Таблица 2

Гидравлические сопротивления участков тепловой сети

Номер участка	Длина, м	Сопротивление, $\text{м} \cdot \text{ч}^2/\text{т}^2$
1	600	0,00011
2	400	0,000117
3	200	0,000077
4	150	0,000157
5	600	0,000257
6	300	0,000236
7	300	0,000256
8	200	0,000356
9	400	0,000156
10	450	0,000296
11	200	0,000206
12	400	0,000156
13	500	0,000216
14	550	0,000276
15	350	0,000356
16	400	0,000456
17	400	0,000156
18	350	0,000166
19	350	0,0002
20	400	0,00017
21	400	0,00019
22	300	0,0002
23	550	0,00025
24	400	0,00014
25	500	0,000203
26	300	0,00015
27	450	0,0001
28	400	0,000356
29	1000	0,000156
30	700	0,00021
31	700	0,00037
32	400	0,00012
33	400	0,0001

Таблица 3

Расчетные технико-экономические показатели

Расчетные показатели	ИТ 1	ИТ 2	ИТ 3
Производство тепловой энергии, млн. Гкал	3,44	4,35	6,70
Затраты на производство тепловой энергии, млрд. руб.	3,36	3,94	5,82
Себестоимость производства тепловой энергии, руб./Гкал	976,7	905,7	868,6
Равновесная цена, руб./Гкал	1 334,71		
Прибыль, млрд. руб.	1,22	1,83	2,81
Объем потребления тепловой энергии промышленным предприятием, млн. Гкал	8,95		
Объем потребления тепловой энергии ЖКХ, млн. Гкал	5,54		
Суммарные сетевые затраты, млрд. руб.	4,81		
Цена на транспорт тепловой энергии, руб./Гкал	330,84		
Суммарная цена для потребителя, руб./Гкал	1665,55		
Рыночная доля, %	23,7	30,0	46,3
Относительная наценка	0,265	0,314	0,285
Средняя относительная наценка	0,288		
Индекс Херфиндаля — Хиршмана	3602		
Показатель дисперсии рыночных долей	0,0089		

ных выше условий представлены в табл. 3. В ней приведены годовые технико-экономические показатели деятельности системы, включая производство тепла теплоисточниками, их потребление, затраты, среднегодовой тариф на производство тепловой энергии теплоисточниками и среднегодовой тариф на транспорт тепла до потребителей. Тариф для потребителей определяется исходя из суммы среднегодовых тарифов производства тепла источниками и транспортировки тепла по тепловой сети. Видно, что наценка на тепловую энергию первого, второго и третьего источников выше их себестоимостей на 26,5, 31,4 и 28,5 % соответственно, а средняя относительная наценка по рынку составляет 28,8 %. Доля цены производства ТЭ в итоговой цене для потребителя составляет около 80 %, а транспорта 20 %. Рыночные доли по генерации тепловой энергии в исследуемом периоде равны 23,7 % для первого ИТ, 30 % для второго ИТ и 46,3 % для третьего ИТ. Данный рынок является высоко концентрированным, это определяется достаточно высоким индексом Херфиндаля — Хиршмана (ННІ), который составляет 3 602. Большое значение индекса ННІ говорит о том, что на рынке присутствуют достаточно высокие барьеры, препятствующие входу на него других ИТ. Это позволяет сделать выводы, что рассмотренный рынок тепловой энергии высокомонополизированный.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена одна из возможных моделей организации теплоснабжения потребителей, представленная в формате «Единый закупщик». В качестве научно-методической базы для ее описания и исследования предложено принять основополагающие принципы теории игр, базовые положения микроэкономики, модели и методы теории гидравлических цепей. Предложенная оригинальная математическая модель теплоснабжающей системы, работающая в условиях организационной структуры «Единый закупщик», обеспечивает получение решения, удовлетворяющего рыночному равновесию Нэша. Отличительная особенность разработанной математической модели заключается в том, что она, наряду с традиционно решаемыми задачами в рамках двухсторонних отношений — источники тепловой энергии и потребители тепла, учитывает сетевую составляющую с характерными для тепловой сети физико-техническими свойствами, а также экономические факторы, связанные с затратами на производство и транспорт тепловой энергии. Данная модель дает возможность определять оптимальные уровни загрузки источников тепловой энергии, обеспечивающие заданный спрос на тепловую энергию со стороны потребителей с учетом получения источниками тепловой энергии максимально возможной прибыли и выполнения при этом условий формирования минимальных затрат на тепловые сети в рассматриваемый период времени.

Предложенный метод может быть применен для анализа и решения задач управления развитием теплоснабжающих систем в условиях модели рынка «Единый закупщик». Разработанная математическая модель в полной мере отражает современные «правила поведения» производителей и потребителей тепловой энергии. Она позволяет учитывать экономические интересы сторон при выполнении физико-технических условий и ограничений по источникам тепла и тепловым сетям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бусыгин В.П., Желободько Е.В., Цыплаков А.А. Микроэкономика — третий уровень. — Новосибирск: Новосибирский гос. ун-т, 2003. — 702 с.
2. Tirole J. The Theory of Industrial Organization. — Cambridge, MA: MIT Press, 1988. — 647 p.
3. Carlton D., Perloff J. Modern Industrial Organization. — N.-Y.: Addison-Wesley, 2000. — 254 p.
4. Авдашева С.Б., Розанова Н.М. Теория организации отраслевых рынков. — М.: Магистр. — 1998. — 320 с.
5. Вурос А.Д., Розанова Н.М. Экономика отраслевых рынков. — М.: Экономический факультет МГУ; ТЕИС, 2002. — 253 с.
6. Зоркальцев В.И., Хамисов О.В. Равновесные модели в экономике и энергетике. — Новосибирск: Наука, 2006. — 221 с.

7. Стоффт С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии: пер. с англ. — М.: Мир, 2006. — 623 с.
8. Bushnell J., Ishii J. An Equilibrium model of investment in restructured electricity markets / CSEM WP 164. Center for the Study of Energy Markets, University of California Energy Institute, 2007. — 37 p.
9. Подковальников С.В., Хамисов О.В. Несовершенные электроэнергетические рынки: моделирование и исследование развития генерирующих мощностей // Известия РАН. Энергетика. — 2012. — № 2. — С. 57–76.
10. Коваленко А.Г., Рубцова Т.П. Моделирование оптового рынка электроэнергии // Вестник Самарского гос. ун-та. — 2007. — № 3. — С. 125–131.
11. Diaz C.A., Villar J., Campos F.A., Reneses J. Electricity market equilibrium based on conjectural variations // Electric Power Systems Research. — 2010. — N 10. — P. 1572–1579.
12. Pozo D., Contreras J., Caballero A., Andrus A. Long-term Nash equilibria in electricity markets // Electric Power Systems Research. — 2011. — N 81. — P. 329–339.
13. Чернавский С.Я., Эйсмонт О.А. Экономический анализ либерализации рынка природного газа в России // Тарифное регулирование и экспертиза. — 2009. — № 2. — С. 43–50.
14. Baltensperger T., Fuchslin R., Krüli P., Lygeros J. Multiplicity of equilibria in conjectural variations models of natural gas markets // European Journal of Operational Research. — 2016. — N 252. — P. 646–656.
15. Коваленко А.Г. Развитие математических моделей и методов теории гидравлических сетей и их применение для моделирования рассредоточенного рынка: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — М.: ВЦ РАН, 2006. — 40 с.
16. Беляев Л.С. Проблемы электроэнергетического рынка. — Новосибирск: Наука, 2009. — 296 с.
17. Агроский В. Единый закупщик в тепловых сетях // Энерго-рынок. — 2005. — № 4. — С. 23–28.
18. Гительман Л.Д., Ратников Б.Е. Энергетический бизнес. — М.: Дело, 2006. — 600 с.
19. Мулен Э. Теория игр с примерами из математической экономики: пер. с фр. — М.: Мир, 1985. — 200 с.
20. Меренков А.П., Хасилев В.Я. Теория гидравлических цепей. — М.: Наука, 1985. — 278 с.
21. Прузнер С.Л., Златопольский А.Н., Некрасов А.М. Экономика энергетике СССР: учеб. — М.: Высшая школа, 1978. — 471 с.
22. Монахов Г.В., Войтинская Ю.А. Моделирование управления режимами тепловых сетей. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 224 с.
23. Stennikov V.A., Khamisov O.V., Penkovsky A.V. Optimization of Developing Heat Supply System in Competitive Market Environment // International Journal of Energy Optimization and Engineering. — 2013. — N 2 (4). — P. 100–119.
24. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. — Новосибирск: Наука, 1987. — 223 с.
25. Стенников В.А., Хамисов О.В., Пеньковский А.В. Возможные механизмы управления теплоснабжением потребителей в условиях рынка // Известия РАН. Энергетика. — 2009. — № 3. — С. 27–36.
26. Соколов Д.В., Стенников В.А., Ощепкова Т.Б., Барахтенко Е.А. Программный комплекс нового поколения для схемно-параметрической оптимизации многоконтурных теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. — 2012. — № 4. — С. 1–6.

Статья представлена к публикации членом редколлегии М.И. Гераскиным.

Стенников Валерий Алексеевич — чл.-корр. РАН, и. о. зам. директора, ✉ SVA@isem.sei.irk.ru,

Пеньковский Андрей Владимирович — науч. сотрудник, ✉ penkovsky@isem.sei.irk.ru,

Хамисов Олег Валерьевич — д-р физ.-мат. наук, зав. отделом, ✉ khamisov@isem.sei.irk.ru,

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



МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ЧИСЛЕННОСТЬЮ СОТРУДНИКОВ ПРЕДПРИЯТИЯ

М.В. Белов

Рассмотрена задача управления численностью сотрудников предприятия с учетом неопределенности бизнеса и трафика сотрудников (процессов увольнений и приема на работу). Даны три варианта постановки задачи, каждый из которых отражает конкретные практические ситуации управления бизнесом: в условиях предположений менеджмента о стационарном или нестационарном развитии бизнеса, а также в случае минимальной априорной информации, требующий робастных решений. Для получения аналитического решения применен метод динамического программирования с вероятностной и интервальной моделями неопределенности. Отмечено, что отсутствие дополнительных предположений о свойствах неопределенности бизнеса и процессов трафика сотрудников (помимо границ интервалов допустимых значений) обеспечивает робастность полученного аналитического решения в интервальной постановке и существенно повышает его практическую ценность.

Ключевые слова: динамическое программирование, вероятностная неопределенность, интервальная неопределенность, управление численностью сотрудников, управление человеческим капиталом фирмы.

ВВЕДЕНИЕ: АКТУАЛЬНОСТЬ ЗАДАЧИ И ТРЕБОВАНИЯ К ЕЕ РЕШЕНИЮ

Статья посвящена аналитическому решению задачи оптимального управления численностью сотрудников — частному случаю управления человеческим капиталом (ЧК) как основным ресурсом предприятия, интенсивно использующим знания и ЧК.

Человеческий капитал рассматривается как организованная совокупность специалистов, обладающих определенными знаниями, навыками, квалификацией и мотивированных на решение стоящих перед ними задач. Для формализации ЧК используется понятие «функциональных домов» (ФД), введенное в статье [1], где было предложено рассматривать группы специалистов, обладающие эквивалентными функциональными возможностями для решения бизнес-задач, как ФД, а перспективную структуру предприятия — как организованный набор ФД. Учитывая широкое распространение различных форм временного привлечения

человеческих ресурсов (например, аутстаффинг¹ и привлечение фрилансеров²), под сотрудниками «функциональных домов» будем понимать не только штатных сотрудников фирмы, но также привлекаемых фрилансеров и сотрудников аутстаффинговых фирм.

Бизнес создает потребность в сотрудниках различных ФД в различные моменты времени. Как правило, бизнес неравномерен, поэтому управление ЧК (в условиях неравномерной потребности) становится нетривиальной задачей. Состояние ЧК как объекта управления будем характеризовать численностями каждого из необходимых для бизнеса ФД.

¹ Аутстаффинг (*англ.* out — «вне» + staff — «штат») — способ управления персоналом, предполагающий оказание услуг в форме предоставления в распоряжение заказчика определенного числа работников, не вступающих с ним в какие-либо правовые отношения (гражданско-правовые, трудовые) напрямую, но оказывающих от имени исполнителя определенные услуги (работы) по месту нахождения заказчика.

² Фрилансер (*англ.* freelancer) — свободный работник, частный специалист.

Оптимальное управление ЧК формируется как решение задачи многошагового принятия решения (на каждом шаге) по численности штатных сотрудников и численности временно привлекаемых в разрезе ФД с учетом неравномерности потребности со стороны бизнеса в целях получения максимально возможного экономического эффекта — минимизации затрат на содержание ЧК.

Задача решается методами динамического программирования в рамках интервальной и вероятностной моделей неопределенности, каждая из которых предназначена для использования в конкретных практических случаях, анализ которых приведен в § 1 ниже. Статья продолжает развитие методов управления ЧК, начатое в работе [2], модели разрабатываются для того, чтобы на практике формировать математически обоснованные рекомендации по принятию управленческих решений менеджерами компаний.

Модели должны учитывать:

(а) численность сотрудников в разрезе их квалификации и мотивации, трафик штатных сотрудников (численности увольняющихся и принимаемых на работу сотрудников) и его неопределенность;

(б) затраты на содержание каждого штатного сотрудника (в том числе на его развитие и перемещения) и временно привлекаемого сотрудника;

(в) потребность бизнеса в определенной численности сотрудников в разрезе их квалификации, неравномерность и неопределенность бизнеса и, следовательно, потребности;

(г) предположения о свойствах процессов, описывающих трафик сотрудников и неопределенность потребности (например, о стационарности или наличии трендов развития процессов).

Модели должны позволять оценивать экономический эффект ЧК в целом в зависимости от факторов (а)—(г) и формировать управление, оптимальное в смысле максимизации экономического эффекта.

На практике апостериорные значения всех факторов (а)—(в) бывают известны точно, затраты (б) также известны точно и для прошедших периодов времени, и для будущих (на разумный горизонт упреждения). Однако априорная информация (а) и (в) о будущих состояниях и свойствах процессов, а также предположения (г) всегда носит неопределенный характер, поэтому формируемые моделями рекомендации по управлению должны быть нечувствительными к этим факторам.

Модели рассматриваются в дискретном представлении времени с фиксированной длительностью интервала, что достаточно естественно для бизнеса, где приняты отчетные периоды; в дальнейшем t будет означать номер интервала времени.

1. ИСТОЧНИКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ВАРИАНТЫ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ

Управление человеческим капиталом затрудняется неопределенностью, которая создается двумя источниками: неравномерностью бизнеса и, следовательно, неравномерностью потребности в ЧК со стороны бизнеса (процесс (а), см. Введение) и трафиком сотрудников — приемом и увольнением по собственному желанию (процесс (в)). Традиционно неопределенность представляют с помощью случайных процессов, аналогично поступим и в данном случае моделирования источников неопределенности (процессов (а) и (в)).

Для формирования оптимальных управляющих воздействий требуется вся имеющаяся информация. Решение рассматриваемой задачи затрудняется отсутствием объективной априорной информации о процессах, вместо нее имеются и могут быть использованы:

(а) предположения, допущения экспертов (менеджеров) о свойствах процессов (параметрах бизнеса);

(б) экспертные оценки и прогнозы конкретных значений, сформированные экспертами;

(в) статистические оценки параметров на основе наблюдений за процессом в течение предыдущих интервалов времени.

При разработке методов решения необходимо учитывать, что информация видов (а) и (б) не может считаться точной и полной, так как предположения, допущения, экспертные оценки и прогнозы всегда субъективны. Статистические оценки (информация вида (в)) в свою очередь, даже будучи сильно состоятельными, формируются на выборках ограниченной длины, поэтому тоже не могут считаться «точными». Однако даже в условиях использования субъективной и неточной априорной информации имеет смысл разрабатывать строгие математические модели в целях построения прогнозных моделей и принятия управленческих решений на их основе. Это подтверждается следующими рассуждениями.

Менеджмент практически всегда может сформировать обоснованные предположения о будущем развитии бизнеса, за который несет ответственность (если это не так, то менеджмент не понимает своего бизнеса и должен быть заменен). Эти предположения могут быть сформулированы в форме экспертных оценок параметров или свойств процессов, описывающих бизнес компании и его контекст в виде сценариев его развития или иной форме. Если сформировать предположения так, чтобы они охватывали все наиболее вероятные варианты развития бизнеса, кроме форс-мажор-



ных, то управление бизнесом будет оптимальным во всех случаях, кроме форс-мажорных обстоятельств. Исключение из рассмотрения форс-мажорных условий и снятие ответственности за действия в таких условиях — обычная бизнес-практика, поэтому логично применить такой подход и в данном случае.

Практически значимыми можно считать следующие три варианта предположений о характере развития бизнеса и его контекста.

I. Руководители считают, что бизнес-условия стабильны (характеристики источников неопределенности постоянны) и возможность их значимых изменений пренебрежимо мала в рамках рассматриваемого горизонта бизнес-прогнозирования. Имеются основания полагать, что характеристики процессов-источников неопределенности могут быть статистически оценены, и эти оценки будут адекватно описывать процессы в рамках горизонта прогнозирования. Задача для этого случая — стационарного процесса потребности в ЧК со стороны бизнеса и трафика сотрудников — будет рассмотрена в § 4.

II. Руководители имеют прогноз изменения бизнеса и/или рынка труда — свойств процессов изменения потребности и трафика сотрудников — и на основании прогноза готовы принимать ответственные решения. Соответствующая задача в общем случае не имеет аналитического решения, зато легко решается численно, (см. далее § 3). Возможны отдельные случаи, допускающие аналитические решения.

III. Руководители видят определенную стационарность бизнеса, но у них имеются соображения о его существенной неравномерности. Предполагается, что границы интервалов допустимых значений процессов могут быть корректно заданы. Но статистические оценки каких-либо других характеристик источников неопределенности, полученные на основе наблюдений за процессами, не будут адекватно отражать поведение процессов в будущем. Этот случай минимальной априорной информации о возможных свойствах процессов изменения потребности и трафика сотрудников будет рассмотрен в § 5.

Фактически варианты I и II отвечают случаям наличия у менеджмента сведений, позволяющих при наличии обоснованного сценария будущего сформировать определенное видение будущего развития ситуации — стационарный (вариант I) и нестационарный (вариант II) случаи. Вариант III отражает случай наличия у менеджмента минимальной априорной информации о бизнесе.

2. ИЗВЕСТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Начиная с работ Беллмана (см., например, обзор [3]) метод динамического программирования (ДП) применяется для управления ресурсами предприятий. В последние годы он стал применяться и для решения задач управления человеческими ресурсами. В ряде работ (в частности, в статье [4]) показано, что модели управления ЧК аналогичны модели управления запасами «Wagner-Whitin».

В работе [5] метод ДП применяется для составления расписания и распределения персонала по множеству проектов по критерию минимизации времени завершения проектов при ограничении на доступные ресурсы. В работе [6] рассматривается задача назначения сотрудников с помощью ДП на множество информационно-технологических проектов с учетом сложности каждого проекта и наличия ресурсов соответствующей квалификации. В работе [7] методом ДП решается задача формирования рабочего графика для сотрудников в специфическом случае, когда в течение каждой недели рабочие дни необходимо чередовать со днями отдыха, причем на последовательность чередования накладываются дополнительные ограничения. Критерием оптимальности служит минимизация затрат на оплату сотрудников (учитывая в том числе назначения на выходные дни). В работе [8] представлено оптимальное управление перемещениями исследователей в рамках учреждений академии наук Китая на основе методов ДП. Авторы работы [9] предлагают вычислительно эффективный алгоритм ДП для распределения разнородных человеческих и физических ресурсов предприятия в задачах транспортировки и логистики. В работе [10] ставится задача оптимального найма и продвижения сотрудников между позициями двух уровней, формулируются теоремы существования решений, задача решается численно, и решение иллюстрируется примерами. В работе [4] выделяются различные виды затрат на ЧК, разрабатывается модель планирования человеческих ресурсов с целью минимизации затрат, примененный подход проиллюстрирован численными примерами. В работе [11] предлагается модель марковского поведения каждого из статистически эквивалентных сотрудников различных грейдов. Методом ДП получены шаблоны оптимального найма и продвижения сотрудников. Оптимальность понимается как минимальное расхождение между целевым и текущим состоянием. Работа [12] посвящена управлению решением задачи управления запасами методами ДП в детерминированной постановке с импульсным управлением, терминальными ограничениями и разрывной целевой функцией.

Марковские модели достаточно широко используются для моделирования и анализа неопределенности в деятельности фирм. Например, поведения сервисных систем (call-center) — времени ожидания, вероятности отказа от обслуживания [13—15] операторов.

В работе [16] предлагается расширение известной нотации описания функционирования предприятий «Business Process Management Notation» (BPMN) элементами, названными «марковскими процессами принятия решений» (Markov Decision Processes) и предназначенными для представления действий сотрудников в ходе выполнения цепочек заданий — принятия решений. Введение таких элементов позволяет осуществлять с помощью BPMN полноценное имитационное моделирование в целях получения численных оценок операционной эффективности бизнеса в целом. В качестве формальной основы функционирования таких элементов предложено использовать различные известные формализмы, в частности, решения на основе метода ДП.

Автор статьи [17] рассматривает вопросы распределения ресурсов предприятия, оказывающего услуги. Для описания неопределенности, свойственной сервисным процессам, используются стохастические модели технологической функции (функция преобразования входов в выходы). Сервисное предприятие в целом представляется как стохастическая (вообще говоря, марковская) сеть.

Выбор стратегий определения уровней неснижаемых/возобновляемых запасов и вопросы управления заказами новых партий запасов в условиях случайной потребности изучаются в работе [18]. Потребности представляются пуассоновскими потоками, рассматриваются стратегии управления с обратными связями и с несколькими поставщиками.

В работе [19] марковская цепь используется для представления поведения сотрудников брокерских фирм. Цель такого моделирования состоит в оценивании будущих доходов, которые могут сформировать сотрудники. Такая оценка применяется для определения размера (в финансовом выражении) человеческого капитала брокерской фирмы при ее поглощении.

В работе [20] представлен набор инструментов, разработанный на основе методов исследования операций в фирме IBM для управления персоналом сервисного дивизиона (годовой оборот которого на момент написания статьи составлял \$4 млрд). Цель разработки и внедрения инструментов — определение уровня инвестиций в развитие персонала для увеличения его бизнес-производительности. Разработчики выделили ряд направлений

инвестиций как наиболее эффективных средств управления: найм, обучение, повышение по карьерной лестнице и удержание в фирме (через поощрения). Набор инструментов позволяет реализовать функции: прогнозирования спроса на человеческие ресурсы; планирования численности на основе риск-анализа; оценки развития и оптимизации квалификации сотрудников; анализа дефицитов и избытков ресурсов по различным специализациям и квалификациям; управления дефицитами и избытками. Для всех инструментов в статье представлены методики, основанные на марковских процессах.

Важно отметить, что в статье [19], написанной одним из основателей учета человеческих ресурсов (HR accounting) E.G. Flamholtz, и в статье [20], описывающей набор инструментов управления крупнейшей сервисной компанией мира, адекватной моделью сотрудников является представление их как независимо действующих агентов с марковским поведением.

Однако, несмотря на большое число работ, в подавляющем большинстве из них или используются упрощающие реальный бизнес предположения, или доказываются теоремы существования решений без получения аналитического решения уравнений Беллмана, или решения получаются в виде численных алгоритмов решения задачи.

Цель настоящей работы заключается в получении аналитического решения задачи ДП в постановках, отражающих практически интересные условия управления предприятием.

Опираясь на известные результаты, перейдем к постановке задачи.

3. ФОРМАЛЬНАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

3.1. Представление человеческого капитала

Движение персонала отличается неопределенностью: численность не может полностью определяться руководством фирмы — увольнения по собственному желанию и прием предложений о работе при найме являются следствиями решений сотрудников, на которые менеджмент может влиять только опосредованно. Как правило, издержки, связанные с увольнением сотрудников по инициативе предприятия, весьма значительны, этот способ на практике не используется для регулярного управления численностью и рассматриваться далее не будет. Управляемым параметром будем считать число предложений о приеме на работу, сделанное в течение одного интервала времени.



Динамику состояния каждого из ФД, составляющих ЧК, будем характеризовать следующей моделью:

$$n(t+1) = n(t) - \mu^*(n(t), n(t-1), \dots, n(0), u(t), t) + u(t) - \mu^{**}(n(t), n(t-1), \dots, n(0), u(t), t),$$

где $n(t)$ — численность штатных сотрудников ФД на начало t -го интервала времени; $\mu^*(n(t), n(t-1), n(t-2), \dots, n(0), u(t), t)$ — случайное число уволившихся сотрудников; запись $n(t-1), n(t-2), \dots, n(0)$ отражает возможность зависимости $\mu^*(\cdot)$ от всей предыстории; $u(t)$ — параметр управления, число предложений о приеме на работу, сделанное в течение одного интервала времени; $\mu^{**}(n(t), n(t+1), n(t+2), \dots, n(0), u(t), t)$ — случайное число сотрудников, не принявших предложение о приеме.

Несмотря на различие процессов $\mu^*(\cdot)$ и $\mu^{**}(\cdot)$ в смысле бизнеса, формально они влияют на численность ФД как единый процесс $\mu(\cdot) = \mu^*(\cdot) + \mu^{**}(\cdot)$, отражающий совокупную неопределенность трафика сотрудников. Тогда модель ФД примет вид:

$$n(t+1) = n(t) + u(t) - \mu(n(t), n(t-1), \dots, n(0), u(t), t). \quad (1)$$

В общем случае не делаем никаких предположений о свойствах процесса $\mu(\cdot)$.

3.2. Модель потребности в человеческом капитале со стороны бизнеса

Потребность в человеческом капитале определяется потоком действий различных типов, которые необходимо осуществить для выполнения обязательств предприятия перед рынком (возникающих в результате продаж и/или постоянно предлагаемых потребителям сервисов различных типов). Примерами таких действий служат операции по изготовлению деталей, сборке агрегатов, обслуживанию клиентов и др. Обозначим $d(t)$ — потребность в сотрудниках t -го ФД на t -м интервале времени:

$$d(t+1) = \delta(d(t), d(t-1), d(t-2), \dots, d(0), t), \quad (2)$$

где $\delta(d(t), d(t-1), d(t-2), \dots, d(0), t)$ — случайная величина, отражающая неопределенность бизнеса, возможно, зависящая от всей предыстории процесса $d(t)$, в общем случае также не будем делать предположений о свойствах процесса $\delta(\cdot)$.

3.3. Представление операционной деятельности предприятия

В рассматриваемой постановке принимаем, что стоимость ЧК в виде штатных сотрудников мень-

ше, чем стоимость временно привлекаемых³, обе эти величины известны и постоянны. Предполагаем, что более дорогие «внешние» ресурсы гарантированно доступны (могут быть привлечены «мгновенно», в любом объеме и на любой необходимый срок⁴). Пусть $0 < \hat{c}_{шт}, c_{out}$ — затраты на содержание одного сотрудника ФД — штатного сотрудника или фрилансера или аутстафера в течение одного интервала времени; причем $0 < \hat{c}_{шт} < c_{out}$.

Предполагаем, что недостающую потребность восполняем внешними, более дорогими, но неограниченно доступными ресурсами (фрилансерами или аутстаферами), т. е. текущие затраты за один интервал времени равны $\hat{c}_{шт}n(t) + c_{out}\max\{0, d(t) - n(t)\}$. Теоретически минимально возможными являются затраты в размере $\hat{c}_{шт}d(t)$ — когда численность всегда совпадает с потребностью.

Введем целевую функцию — превышение фактических затрат на человеческий капитал над минимально возможными в течение одного периода:

$$R(x) = \begin{cases} \hat{c}_{шт}x & \text{при } x \geq 0, \\ (c_{out} - \hat{c}_{шт})|x| & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Если разовые затраты на найм сотрудников в штат или привлечение внешних сотрудников пренебрежимо малы по сравнению с текущим содержанием (единицы процентов), что часто соответствует бизнес-практике, то целевая функция за период времени $1 \leq t \leq T$:

$$V_{0,T} = \sum_{t=1}^T \gamma^t R(n(t) + u(t) - \mu(t) - \delta(t)), \quad (4)$$

где γ — дисконтирующий по времени множитель.

Будем искать оптимальное управление, которое обеспечит минимум целевой функции $u(n, t) = \arg\{\min_n V_{0,T}\}$.

Поставленная задача — типичная оптимизационная задача многошагового принятия решений, поэтому вполне естественно применить для ее решения метод динамического программирования.

Для варианта I предположений о характере развития бизнеса и его контекста (стабильность условий и возможность использования оценок харак-

³ Если это не так, то очевидная стратегия заключается в отказе от штатных сотрудников и использовании только временно привлекаемых ресурсов в точном соответствии изменяющейся потребности.

⁴ В «любом объеме» понимается в смысле возможности обеспечить любую практически возможную потребность бизнеса; «на любой необходимый срок» — привлечение может быть мгновенно завершено при исчезновении потребности.

теристик процессов для их описания в будущем) воспользуемся стационарными динамическими моделями процессов с вероятностными неопределенностями $\mu(t)$ и $\delta(t)$. Сделаем допущение (в дальнейшем будем ссылаться на него как на «допущение I») о независимости функций распределения вероятностей процессов δ и μ от времени и от предыдущих значений процессов, т. е. для любых t , $\mu(t-1)$, $\mu(t-2)$, ..., $\mu(0)$ и $\delta(t-1)$, $\delta(t-2)$, ..., $\delta(0)$ справедливы соотношения $Pr\{\delta(t) = d\} = Q_d$ и $Pr\{\mu(t) = m\} = P_m$. Тогда функциональные уравнения Беллмана примут форму:

$$F_T(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ \sum_{\mu=0}^{n+u} \sum_{\delta=d_{\min}}^{d_{\max}} R(n+u-\mu-\delta) Q_{\delta} P_{\mu} \right\},$$

$$F_t(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ \sum_{\mu=0}^{n+u} \left[\sum_{\delta=d_{\min}}^{d_{\max}} R(n+u-\mu-\delta) Q_{\delta} + \gamma F_{t+1}(n+u-\mu) \right] P_{\mu} \right\}, \quad (5)$$

где Q_{δ} и P_{μ} — функции распределения вероятностей процессов δ и μ .

«Допущение I» является корректным во многих практически интересных случаях развитого рынка труда, и часто принимаются для описания поведения сотрудников [12, 14, 15]. При устоявшихся и общепринятых требованиях к компетенциям, свободном законодательстве, признаваемом другими компаниями опытом, быстром вхождении новых сотрудников в деятельность предприятия модель поведения сотрудников хорошо описывается марковскими процессами, пример такого рынка рассмотрен в работе [2].

Уравнения (5) будут аналитически решены в § 4, в результате будет получена стратегия оптимального управления $u = u(n, t)$.

В случае варианта II предположений о характере развития бизнеса (наличие значимого прогноза изменения бизнеса и/или рынка труда — свойств процессов изменения потребности и трафика сотрудников) воспользуемся нестационарными динамическими моделями процессов с вероятностными неопределенностями $\mu(t)$ и $\delta(t)$. Тогда функциональные уравнения для оптимального управления примут вид:

$$F_T(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ \sum_{\mu=0}^{n+u} \sum_{\delta=d_{\min}}^{d_{\max}} R(n+u-\mu-\delta) \times \right.$$

$$\left. \times Q_{\delta}(T) P_{\mu}(n+u, T) \right\}, \quad (6)$$

$$F_t(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ \sum_{\mu=0}^{n+u} \left[\sum_{\delta=d_{\min}}^{d_{\max}} R(n+u-\mu-\delta) Q_{\delta}(t) + \gamma F_{t+1}(n+u-\mu) \right] P_{\mu}(n+u, t) \right\}.$$

Уравнения (6) в общем случае не имеют аналитического решения, но легко решаются численно.

В заключении будет указан частный случай аналитического решения уравнений (6).

В случае варианта III (минимальных априорных знаний об источниках неопределенности) воспользуемся интервальной моделью неопределенности. Тогда функциональные уравнения будут записаны как

$$F_T(n) = \min_{u \geq 0} \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]; \delta \in [\tilde{\delta}_-, \tilde{\delta}_+]} \{R(n+u-\mu-\delta)\},$$

$$F_t(n) = \min_{u \geq 0} \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]; \delta \in [\tilde{\delta}_-, \tilde{\delta}_+]} \{R(n+u-\mu-\delta) + \gamma F_{t+1}(n+u-\mu)\}, \quad (7)$$

где $[\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]$ и $[\tilde{\delta}_-, \tilde{\delta}_+]$ — интервалы допустимых значений процессов μ и δ , заданные своими границами.

Важно заметить, что в этом случае нет необходимости в каких-либо предположениях о свойствах процессов μ и δ . Решению уравнений (7) посвящен § 5.

4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассмотрим стационарный случай: предположим, что процессы $d(t)$, $n(t)$, $u(t)$, $\mu(x, t)$ и $\delta(t)$ стационарные.

В рамках «допущения I» задача (1)—(5) представляют собой частный случай управляемой марковской цепи, которая достаточно подробно изучена в литературе по стохастическому оцениванию и управлению — см., например, работы [21, 22]. В первой из них подробно рассмотрена задача оценивания параметров марковской цепи, доказано существование и единственность оптимального управления ею, показано, что управляющие воздействия также образуют марковскую цепь. Для решения задачи (1)—(6) воспользуемся известными результатами и получим практически интересные выводы для важных частных случаев.

На основании результатов, полученных в работе [21], можно заключить, что выборочные гистограммы распределений Q_{δ} и P_{μ} будут наилучшими из оценок: выборочные гистограммы являются оценками максимального правдоподобия. Доказа-



но [21], что оценки максимального правдоподобия параметров управляемой марковской цепи являются сильно состоятельными. Кроме этого, управление, построенное на основании таких оценок «самооптимизирующееся» (self-optimizing), т. е. сходящимся в смысле Чезаро к оптимальному управлению по критерию минимальной стоимости (см. теорему 6.5 [21], с. 272). Поэтому в дальнейшем будем использовать выборочные гистограммы Q_δ и P_μ в качестве распределений.

Оптимальное управление $u^*(n) = \arg \min_u \{ \dots \}$ получается как решение функциональных уравнений (5) при условиях (1)–(4).

Все преобразования и объяснения, сопровождающие решение задачи (1)–(5) вынесены в Приложение.

Фактически управление сводится к поддержанию постоянного уровня $n(t) = x_{g_opt}$, причем значение самого уровня x_{g_opt} зависит от свертки распределений P_μ и Q_δ , а не от каждого из распределений в отдельности и получается из правила $x_{g_opt} = \Psi(\alpha_{шт_out}; \hat{Q}_\epsilon)$, определенного в Приложении.

При реализации данной стратегии управления модель поведения сотрудников и бизнеса в целом примет вид:

$$\begin{aligned} n(t+1) &= x_{g_opt} - \mu(x_{g_opt}; t) = x_{g_opt} - \mu(t), \\ u(t+1) &= x_{g_opt} - n(t), \\ d(t+1) &= \delta(t), \end{aligned} \quad (8)$$

$$V_{0,T} = \sum_{t=1}^T E[\gamma^t R(x_{g_opt} - \mu(t) - \delta(t))].$$

Важно отметить, что при получении решения (8) относительно свойств процессов $\mu(t)$ и $d(t)$ не было принято никаких предположений, кроме стационарности, т. е. неизменности распределений P_μ и Q_δ по времени. Эта особенность решения (8) имеет существенное практическое значение — обеспечивает устойчивость решения по отношению к форме распределений P_μ и Q_δ , что особенно важно в условиях неточного знания свойств этих распределений.

Базовое решение (8) пригодно для применения и в отдельных нестационарных случаях. В частности, при прогнозе роста потребности в виде $d(t) = d_0(t) + \delta(t)$, где $d_0(t)$ — известная неубывающая функция от t , а $\delta(t)$ — случайная последовательность, то оптимальная стратегия получится в виде: $u_{opt}(n, t) = x_{g_opt} + d_0(t) - n(t)$.

5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ИНТЕРВАЛЬНОЙ МОДЕЛИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассмотрим вариант III постановки, когда в задаче (1)–(4) известны только граничные значения интервалов допустимых значений процессов, отражающих неопределенность бизнеса $\delta(t)$ и трафика сотрудников $\mu(t)$. Относительно других характеристик процессов предположений не делается.

Решение задачи (1)–(4), (7) также вынесено в Приложение. Минимаксная стратегия для этого случая имеет тот же вид, что и для стационарного случая вероятностной неопределенности: поддержание постоянного уровня $x_{int} = \arg\{\min\{A_t([x_{<\mu\delta>}]); A_t([x_{<\mu\delta>}] + 1)\}\}$, где $x_{<\mu\delta>} = (1 - \alpha_{шт_out})\tilde{e}_+ + \alpha_{шт_out}\tilde{e}_-$. Тогда минимаксная стратегия получится в виде $u_{opt}(n) = \max\{0, x_{game} - n\}$:

$$n(t+1) = x_{int} - \mu(x_{int}, t),$$

$$u(t+1) = \max_T\{0, x_{int} - n(t)\},$$

$$d(t+1) = \delta(t),$$

$$V_{0,T} = \sum_{t=1}^T E[\gamma^t R(x_{int} - \mu(x_{int}, t) - \delta(t))].$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение обсудим полученные результаты.

Прежде всего, получены решения задачи управления человеческим капиталом для трех практически важных вариантов поведения бизнеса.

Вариант I. *Стационарная вероятностная постановка*: менеджмент считает возможным использовать полученные на основе предыстории оценки характеристик источников неопределенности для прогнозирования их будущего поведения.

Вариант II. *Нестационарная вероятностная постановка*: менеджмент имеет прогноз изменения бизнеса и/или рынка труда — свойств процессов изменения потребности и трафика сотрудников — и на основании прогноза готов принимать ответственные решения.

Вариант III. *Интервальная постановка*: менеджмент считает достоверными только границы интервалов допустимых значений процессов, не доверяя оценкам других характеристик.

Для вариантов I и III получены аналитические решения, для варианта II аналитическое решение (как развитие варианта I) может быть получено в некотором частном, указанном в статье, случае.

Полученные в аналитическом виде стратегии управления соответствуют интуитивно понятным стратегиям поддержания постоянного уровня численности сотрудников. Постоянные уровни в обоих случаях зависят от:

— отношения затрат на содержание одного штатного сотрудника к затратам на фрилансера или аутстафера;

— характеристик суммарного процесса потребности в сотрудниках со стороны бизнеса и трафика сотрудников (см. выражения для x_{g_opt} и x_{int}).

Наконец, полученные результаты описывают простые стратегии управления, и для их получения было сделано небольшое число предположений о реальных процессах (в интервальной постановке вообще не было сделано никаких предположений, кроме граничных значений интервалов допустимых значений). Поэтому полученные стратегии мало чувствительны к заданию условий применения и просты для практической реализации.

ПРИЛОЖЕНИЕ

П.1. Решение функциональных уравнений вероятностной задачи

Решаем задачу (5):

$$F_T(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ \sum_{\mu=0}^{n+u} \sum_{\delta=d_{\min}}^{d_{\max}} R(n+u-\mu-\delta) Q_{\delta} P_{\mu} \right\},$$

$$F_T(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ \sum_{\mu=0}^{n+u} \left[\sum_{\delta=d_{\min}}^{d_{\max}} R(n+u-\mu-\delta) Q_{\delta} + \right. \right. \\ \left. \left. + \gamma F_{T-1}(n+u-\mu) \right] P_{\mu} \right\}.$$

Обозначим $\varepsilon = \delta + \mu$ (с функцией распределения вероятности $\hat{Q}_{\varepsilon}$ как свертка P_{μ} и Q_{δ}), $\varepsilon \in [d_{\min}, d_{\max}]$.

Введем функцию $g(x) = E[R(x)] = \hat{c}_{шт} \sum_{\varepsilon=d_{\min}}^x (x-\varepsilon) \hat{Q}_{\varepsilon} +$

$+(c_{out} - \hat{c}_{шт}) \sum_{\varepsilon=x}^{d_{\max}} (\varepsilon - x) \hat{Q}_{\varepsilon}$, имеющую смысл условного математического ожидания целевой функции на периоде при условии, что сумма численности штатных сотрудников $n(t)$ и сделанных предположений о приеме на работу $u(t)$ равна x сотрудников.

Тогда для стационарного случая функциональные уравнения примут вид:

$$F_T(n) = \min_{u \geq 0} \{g(n+u)\}, \quad (П.1)$$

$$F_{T-1}(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ g(n+u) + \gamma \sum_{\mu} F_T(n+u-\mu) P_{\mu} \right\}. \quad (П.2)$$

В формуле (П.2) и ниже суммирование по μ предполагает один и тот же диапазон изменений μ , поэтому для упрощения записи пределы суммы опущены.

Исследуем свойства функции $g(x)$. Из определения можно получить более удобные выражения для функции $g(x)$:

$$g(x) = \begin{cases} (c_{out} - \hat{c}_{шт})(\bar{d} + \bar{\mu} - x) & \text{при } x < \hat{d}_{\min}, \\ (c_{out} - \hat{c}_{шт})(\bar{d} + \bar{\mu} - x) + c_{out} \sum_{\varepsilon=\hat{d}_{\min}}^x (x-\varepsilon) \hat{Q}_{\varepsilon} & \\ \text{при } \hat{d}_{\min} \leq x < \hat{d}_{\max}, & \\ \text{или } \hat{c}_{шт}(x - \bar{d} - \bar{\mu}) + c_{out} \sum_{\varepsilon=x}^{\hat{d}_{\max}} (\varepsilon - x) \hat{Q}_{\varepsilon} & \\ \text{при } \hat{d}_{\min} \leq x < \hat{d}_{\max}, & \\ c_{шт}(x - \bar{d} - \bar{\mu}) & \text{при } \hat{x} \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}$$

Первые разности $g(x)$ имеют вид $\Delta g(x) = g(x) - g(x-1) = -(c_{out} - \hat{c}_{шт}) + c_{out} \sum_{\varepsilon=\hat{d}_{\min}}^x \hat{Q}_{\varepsilon}$, а вторые —

$\Delta^2 g(x) = c_{out} \hat{Q}_x$. Они отрицательны (равны $-(c_{out} - \hat{c}_{шт})$)

при $x \leq \hat{d}_{\min}$ и положительны (равны $\hat{c}_{шт}$) при $x \leq \hat{d}_{\max}$.

Так как вторые разности всегда неотрицательны $\Delta^2 g(x) = c_{out} \hat{Q}_x > 0$, то $\Delta g(x)$ монотонно возрастает и меняет знак единожды, поэтому $g(x)$ имеет единственный минимум. Точку минимума x_{g_opt} (где $\Delta g(x)$ меняет знак) найдем с помощью следующего правила.

Последовательно увеличивая x на единицу, начиная от

$\hat{d}_{\min}$, найдем x_1 такое, что $\sum_{\varepsilon=\hat{d}_{\min}}^{x_1-1} \hat{Q}_{\varepsilon} \leq \alpha_{шт_out} = 1 - \hat{c}_{шт}/c_{out}$,

а $\sum_{\varepsilon=\hat{d}_{\min}}^{x_1} \hat{Q}_{\varepsilon} \geq \alpha_{шт_out}$, тогда $x_{g_opt} = \arg\{\min_T \{g(x_1-1); g(x_1)\}\}$.

Фактически x_{g_opt} является (приближенным значением) $\alpha_{шт_out}$ — квантилем распределения суммы величин потребности δ и трафика μ . Символически это правило будем обозначать как $x_{g_opt} = \Psi(\alpha_{шт_out}, \hat{Q}_{\varepsilon})$.

Рассмотрим уравнение (П.1), в силу свойств $g(x)$

$$F_T(n) = \begin{cases} g(x_{g_opt}) = \text{const} & \text{при } n \leq x_{g_opt}, u = x_{g_opt} - n, \\ g(n) & \text{при } n > x_{g_opt}, u = 0. \end{cases} \quad (П.3)$$

Рассмотрим уравнение (П.2) для $F_{T-1}(n)$:

$$F_{T-1}(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ g(n+u) + \gamma \sum_{\mu} F_T(n+u-\mu) P_{\mu} \right\}.$$

Введем функцию $h_T(x) = \sum_{\mu} F_T(x-\mu) P_{\mu}$, тогда $F_{T-1}(n) = \min_{u \geq 0} \{g(n+u) + \gamma h_T(n+u)\}$ и проанализируем ее поведение на разных интервалах области определения.



При $x \leq x_{g_{opt}}$ $h_T(x) = g(x_{g_{opt}}) = \text{const}$.

Оценим первые разности $\Delta h_T(x)$ при $x > x_{g_{opt}}$:

$$\begin{aligned}\Delta h_T(x) &= \sum_{\mu} F_T(x - \mu) P_{\mu} - \sum_{\mu} F_T(x - 1 - \mu) P_{\mu} = \\ &= \sum_{\mu} \Delta F_T(x - \mu) P_{\mu}.\end{aligned}$$

В силу свойств функции $g(x)$ и выражений (П.3) первые разности ΔF_T всегда неотрицательны, поэтому разности $\Delta h_T(x)$ также неотрицательны, поэтому функция $h_T(x)$ монотонно неубывающая при $x > x_{g_{opt}}$:

$$h_T(x) = \begin{cases} g(x_{g_{opt}}) = \text{const} & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ g(x) - f(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ c_{шт}(x - \bar{d} - 2\bar{\mu}) & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}, \end{cases}$$

где $f(x)$ — некоторая функция, монотонно возрастающая на отрезке $[x_{g_{opt}}; \hat{d}_{\max}]$ от 0 до $\hat{c}_{шт} \bar{\mu}$.

Тогда

$$\begin{aligned}g(x) + \gamma h_T(x) &= \\ &= \begin{cases} g(x) + \gamma g(x_{g_{opt}}) = \text{const} & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma)g(x) - \gamma f(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma)g(x) - \gamma \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}, \end{cases}\end{aligned}$$

т. е. сумма $g(x) + \gamma h_T(x)$ монотонно убывает при $x \leq x_{g_{opt}}$ и монотонно растет при $x > x_{g_{opt}}$, и тогда

$$\begin{aligned}F_{T-1}(n) &= \\ &= \begin{cases} (1 + \gamma)g(x_{g_{opt}}) = \text{const} & \text{при } n \leq x_{g_{opt}}, u = x_{g_{opt}} - n, \\ g(n) + \gamma h_T(x) & \text{при } n > x_{g_{opt}}, u = 0, \end{cases}\end{aligned}$$

$$F_{T-1}(x) = \begin{cases} (1 + \gamma)g(x_{g_{opt}}) & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma)g(x) - \gamma f(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma)g(x) - \gamma \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}$$

Утверждения про свойства функций $F_t(n)$ и $h_t(n)$ могут быть последовательно доказаны методом математической индукции для любого $t < T$, уменьшая t , переходя $t + 1 \rightarrow t$.

Для функции $h_{T-1}(x) = \sum_{\mu} F_{T-1}(x - \mu) P_{\mu}$ справедливы соображения, высказанные для $h_T(n)$, это было proved выше, поэтому:

$$\begin{aligned}h_{T-1}(x) &= \\ &= \begin{cases} (1 + \gamma)g(x_{g_{opt}}) = \text{const} & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma)g(x) - \bar{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma)g(x) - \gamma \hat{c}_{шт} \bar{\mu} - (1 + \gamma)\hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}\end{aligned}$$

где $\bar{f}(x)$ — некоторая функция, монотонно возрастающая на отрезке $[x_{g_{opt}}; \hat{d}_{\max}]$ от 0 до $(1 + 2\gamma)\hat{c}_{шт} \bar{\mu}$.

Теперь для суммы $g(x) + \gamma h_{T-1}(x)$ можно записать:

$$\begin{aligned}g(x) + \gamma h_{T-1}(x) &= \\ &= \begin{cases} g(x) + \gamma(1 + \gamma)g(x_{g_{opt}}) = \text{const} & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma + \gamma^2)g(x) - \gamma \bar{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma + \gamma^2)g(x) - \gamma(1 + 2\gamma)\hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}\end{aligned}$$

Обозначим $\Gamma_k = \sum_{i=0}^k \gamma^i = (1 - \gamma^{k+1})/(1 - \gamma)$, $\Delta_k = \sum_{i=1}^k i\gamma^{i-1} = \gamma^{k-1} + \frac{1 - \gamma^{k-1}}{(1 - \gamma)^2} - \frac{(k-1)\gamma^k}{1 - \gamma}$, тогда

$$\begin{aligned}g(x) + \gamma h_{T-1}(x) &= \\ &= \begin{cases} \Gamma_2 g(x_{g_{opt}}) = \text{const} & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_2 g(x) - \gamma \bar{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_2 g(x) - \gamma \Delta_2 \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}\end{aligned}$$

Получим:

$$F_{T-2}(x) = \begin{cases} \Gamma_2 g(x_{g_{opt}}) & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_2 g(x) - \gamma \bar{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_2 g(x) - \gamma \Delta_2 \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}$$

Пусть:

$$F_{T-n}(x) = \begin{cases} \Gamma_n g(x_{g_{opt}}) & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_n g(x) - \gamma \bar{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_n g(x) - \gamma \Delta_n \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}$$

где $\bar{f}(x)$ — некоторая функция, монотонно возрастающая на отрезке $[x_{g_{opt}}; \hat{d}_{\max}]$ от 0 до $\Delta_n \hat{c}_{шт} \bar{\mu}$.

Так как $h_{T-n}(x) = \sum_{\mu} F_{T-n}(x - \mu) P_{\mu}$, то

$$h_{T-n}(x) = \begin{cases} \Gamma_n g(x_{g_{opt}}) & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_n g(x) - \bar{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_n g(x) - (\gamma \Delta_n + \Gamma_n) \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}$$

Преобразуем $\gamma \Delta_n + \Gamma_n = \sum_{i=0}^n i\gamma^i + \sum_{i=0}^n \gamma^i = \sum_{i=0}^n (i+1)\gamma^i = \sum_{i=0}^{n+1} i\gamma^{i-1} = \Delta_{n+1}$.

Тогда

$$g(x) + \gamma h_{T-n}(x) = \begin{cases} g(x) + \gamma \Gamma_n g(x_{g_{opt}}) & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma \Gamma_n)g(x) - \gamma \tilde{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ (1 + \gamma \Gamma_n)g(x) - \gamma \Delta_{n+1} \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}$$

В результате получим:

$$F_{T-(n+1)}(x) = \begin{cases} \Gamma_{n+1} g(x_{g_{opt}}) & \text{при } x \leq x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_{n+1} g(x) - \gamma \tilde{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ \Gamma_{n+1} g(x) - \gamma \Delta_{n+1} \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}$$

Тогда из логической цепочки математической индукции последует, что для любого $t \leq T$ справедливо:

$$F_t(n) = \begin{cases} \frac{1-\gamma^{T-t+1}}{1-\gamma} g(x_{g_{opt}}) & \text{при } n \leq x_{g_{opt}}, \\ \frac{1-\gamma^{T-t+1}}{1-\gamma} g(n) - \gamma \tilde{f}(x) & \text{при } \hat{d}_{\max} > x > x_{g_{opt}}, \\ \frac{1-\gamma^{T-t+1}}{1-\gamma} g(n) - \gamma \left(\sum_{i=0}^{T-t} \gamma^i \right) \hat{c}_{шт} \bar{\mu} & \text{при } x \geq \hat{d}_{\max}. \end{cases}$$

Из выражения для $F_t(n)$ можно легко получить оптимальное значение целевой функции $F_t(x_{g_{opt}}) = \frac{1-\gamma^{T-t+1}}{1-\gamma} g(x_{g_{opt}})$, а для стационарного случая ($T \rightarrow \infty$)

$$\text{в виде } F_{\infty}(x_{g_{opt}}) = \frac{1}{1-\gamma} g(x_{g_{opt}}).$$

Функции $F_t(n)$ не представляют самостоятельного интереса, однако выражения для $F_t(n)$ позволяют сформировать стратегию оптимального управления для стационарного случая:

$$u_{opt}(n) = \begin{cases} x_{g_{opt}} - n & \text{при } n < x_{g_{opt}}, \\ 0 & \text{при } n \geq x_{g_{opt}}, \end{cases}$$

где значение $x_{g_{opt}}$ получено из описанного выше правила $x_{g_{opt}} = \Psi(\alpha_{шт_out}, \hat{Q}_{\varepsilon})$, а $\alpha_{шт_out} = 1 - \hat{c}_{шт} / c_{out}$.

П.2. Решение функциональных уравнений интервальной задачи

Функциональные уравнения Беллмана интервальной задачи имеют вид:

$$\begin{aligned} F_T(n) &= \\ &= \min_{u \geq 0} \max_{\mu \in [\bar{\mu}_-, \bar{\mu}_+]; \delta \in [\bar{\delta}_-, \bar{\delta}_+]} \{R(n + u - \mu - \delta)\}, \\ F_t(n) &= \min_{u \geq 0} \max_{\mu \in [\bar{\mu}_-, \bar{\mu}_+]; \delta \in [\bar{\delta}_-, \bar{\delta}_+]} \{R(n + u - \mu - \delta) + \\ &\quad + \gamma F_{t+1}(n + u - \mu)\}. \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

Рассмотрим первое из уравнения (П.4).

Обозначим $R_{<\mu, \delta>}(x) = \max_{z \in [\bar{e}_-, \bar{e}_+]} \{R(x - z)\}$. В силу линейности $R(\cdot)$ на полуосях функция $R_{<\mu, \delta>}(\cdot)$ также будет кусочно-линейной и иметь вид⁵:

$$R_{<\mu, \delta>}(x) = \begin{cases} c_{шт}(x - \bar{e}_-) & \\ \text{при } x \geq x_{<\mu, \delta>} = (1 - \alpha_{шт_out})\bar{e}_+ + \alpha_{шт_out}\bar{e}_-, & \\ (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \bar{e}_+) & \text{при } x \leq x_{<\mu, \delta>}. \end{cases}$$

Тогда, учитывая равенство $F_T(n) = \min_{u \geq 0} \{R_{<\mu, \delta>}(n + u)\}$, получим

$$\begin{aligned} F_T(x) &= \\ &= \begin{cases} c_{шт}(x - \bar{e}_-) & \\ \text{при } x \geq x_{<\mu, \delta>}, & \\ R_{<\mu, \delta>} = \hat{c}_{шт}(1 - \alpha_{шт_out})(\bar{e}_+ - \bar{e}_-) & \text{при } x \leq x_{<\mu, \delta>}. \end{cases} \end{aligned}$$

Теперь рассмотрим второе из уравнений (П.4) при $t = T - 1$.

$$\begin{aligned} F_{T-1}(n) &= \min_{u \geq 0} \max_{\mu, \delta} \{R(n + u - \mu - \delta) + \gamma F_T(n + u - \mu)\} = \\ &= \min_{u \geq 0} \{\max_{\mu} \{\max_{\delta} \{R(n + u - \mu - \delta)\} + \gamma F_T(n + u - \mu)\}\}. \end{aligned}$$

Введем функцию $R_{<\delta>}(x) = \max_{z \in [\bar{\delta}_-, \bar{\delta}_+]} \{R(x - z)\}$, тогда

$$F_{T-1}(n) = \min_{u \geq 0} \{\max_{\mu} \{R_{<\delta>}(n + u - \mu) + \gamma F_T(n + u - \mu)\}\}.$$

Для $R_{<\delta>}(x)$ справедливы все замечания относительно функции $R_{<\mu, \delta>}(x)$, поэтому:

$$R_{<\delta>}(x) = \begin{cases} \hat{c}_{шт}(x - \bar{\delta}_-) & \\ \text{при } x \geq x_{<\delta>} = (1 - \alpha_{шт_out})\bar{\delta}_+ + \alpha_{шт_out}\bar{\delta}_-, & \\ (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \bar{\delta}_+) & \text{при } x \leq x_{<\delta>}. \end{cases}$$

Так как все граничные значения процессов μ и δ неотрицательны, то⁶ $x_{<\mu, \delta>} \geq x_{<\delta>} \geq 0$.

Обозначим сумму функций $R_{<\delta>}(x) + \gamma F_T(x)$ как $A_T(x)$ и получим выражение для нее:

$$A_T(x) = \begin{cases} (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \bar{\delta}_+) + \gamma R_{<\mu, \delta>} & \text{при } x \leq x_{<\delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \bar{\delta}_-) + \gamma R_{<\mu, \delta>} & \text{при } x_{<\delta>} \leq x \leq x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \bar{\delta}_-) + \gamma \hat{c}_{шт}(x - \bar{e}_-) & \text{при } x_{<\mu, \delta>} \leq x. \end{cases}$$

Тогда уравнение для $F_{T-1}(n)$ примет вид: $F_{T-1}(n) = \min_{u \geq 0} \{\max_{\mu \in [\bar{\mu}_-, \bar{\mu}_+]} \{A(n + u - \mu)\}\}$.

⁵ При $x \geq x_{<\mu, \delta>}$ выполняется $R(x - \bar{e}_-) \geq R(x - \bar{e}_+)$, поэтому $R^*(x - \bar{e}_-) = \hat{c}_{шт}(x - \bar{e}_-)$, аналогично при $x \leq x_{<\mu, \delta>}$ — $R(x - \bar{e}_+) \geq R(x - \bar{e}_-)$, поэтому $R^*(x) = R(x - \bar{e}_+) = (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \bar{e}_-)$. Значение $x_{<\mu, \delta>}$ находим из $\hat{c}_{шт}(x - \bar{e}_-) = (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \bar{e}_-)$.

⁶ $x_{<\mu, \delta>} = (1 - \alpha_{шт_out})\bar{e}_+ + \alpha_{шт_out}\bar{e}_- \geq (1 - \alpha_{шт_out})\bar{\delta}_+ + \alpha_{шт_out}\bar{\delta}_- = x_{<\delta>}$.



Получим выражение для $\max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]} \{A(n + u - \mu)\}$:

$$\begin{aligned} & \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]} \{A_T(x - \mu)\} = \\ & = \begin{cases} (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \tilde{\delta}_+ - \tilde{\mu}_+) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x \leq x_1, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\mu}_- - \tilde{\delta}_-) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x_1 \leq x \leq x_2, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\mu}_- - \tilde{\delta}_-) + \gamma \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\mu}_- - \tilde{e}_-) & \text{при } x_2 \leq x, \end{cases} \\ & \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]} \{A_T(x - \mu)\} = \\ & = \begin{cases} (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \tilde{e}_+) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x \leq x_1, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x_1 \leq x \leq x_2, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \gamma \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\mu}_- - \tilde{e}_-) & \text{при } x_2 \leq x. \end{cases} \end{aligned}$$

Так как функция при $x \leq x_1$ и $x_1 \leq x$ полностью совпадает с функцией $R_{s<\mu, \delta>}(x)$, то точка x_1 совпадает с точкой $x_{<\mu, \delta>}$.

Далее,

$$\begin{aligned} & \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]} \{A_T(x - \mu)\} = \\ & = \begin{cases} (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \tilde{e}_+) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x \leq x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x_{<\mu, \delta>} \leq x \leq x_2, \\ (1 + \gamma) \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- & \text{при } x_2 \leq x. \end{cases} \end{aligned}$$

Эта функция достигает минимума — в точке $x_{<\mu, \delta>}$, и он равен $(1 + \gamma) R_{s<\mu, \delta>}$.

Из уравнения $\hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} = (1 + \gamma) \hat{c}_{шт} \times (x - \tilde{e}_-) - \gamma \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_-$ найдем точку $x_2 = \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>}$.

Тогда

$$\begin{aligned} & F_{T-1}(n) = \\ & = \begin{cases} (1 + \gamma) R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x \leq x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x_{<\mu, \delta>} \leq x \leq \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>}, \\ (1 + \gamma) \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- & \text{при } \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>} \leq x. \end{cases} \end{aligned}$$

Рассмотрим

$$\begin{aligned} & F_{T-2}(n) = \min_{u \geq 0} \left\{ \max_{\mu} \left\{ \max_{\delta} \{R(n + u - \mu - \delta)\} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \gamma F_T(n + u - \mu) \right\} \right\} = \min_{u \geq 0} \{ \max_{\mu} \{ R_{<\delta>}(n + u - \mu) + \gamma F_T(n + u - \mu) \} \}. \end{aligned}$$

Обозначим $R_{<\delta>}(x) + \gamma F_{T+1}(x) = A_{T-1}(x)$,

$$\begin{aligned} & A_{T-1}(x) = \\ & = \begin{cases} (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \tilde{\delta}_+) + \gamma(1 + \gamma) R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x \leq x_{<\delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma(1 + \gamma) R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x_{<\delta>} \leq x \leq x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \gamma^2 R_{s<\mu, \delta>} & \text{при } x_{<\mu, \delta>} \leq x \leq \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma(1 + \gamma) \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma^2 \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- & \text{при } \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>} \leq x. \end{cases} \end{aligned}$$

Функция $A_{T-1}(x) = A_T(x) + \gamma^2 R_{s<\mu, \delta>}$ при $x \leq \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>}$.

Покажем методом математической индукции, что для всех $0 < i \leq T$ выполняется $A_{T-i}(x) = A_T(x) + \aleph(i)$ при $x \leq \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>}$, где $\aleph(i)$ — некоторая функция, зависящая от γ , i и $R_{s<\mu, \delta>}$, но не зависящая от x .

Для $i = 1$ соотношение получено выше.

Пусть для некоторого $1 < i \leq T$

$$\begin{aligned} & A_{T-i}(x) = \\ & = \begin{cases} (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \tilde{\delta}_+) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i) & \text{при } x \leq x_{<\delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i) & \text{при } x_{<\delta>} \leq x \leq x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \aleph(i) & \text{при } x_{<\mu, \delta>} \leq x \leq \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma(1 + \gamma) \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma^2 \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- & \text{при } \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>} \leq x. \end{cases} \end{aligned}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} & \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]} A_{T-i}(x - \mu) = (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \tilde{\delta}_+ - \tilde{\mu}_+) + \\ & + \gamma R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i) = (\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \tilde{e}_+) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i) \\ & \text{при } x \leq x_{<\mu, \delta>}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]} A_{T-i}(x - \mu) = \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\mu}_- - \tilde{\delta}_-) + \\ & + \gamma R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i) = \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i) \text{ при } \\ & x_{<\mu, \delta>} \leq x \leq x_{<\mu, \delta>} + \tilde{\mu}_-; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]} A_{T-i}(x - \mu) = \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\mu}_- - \tilde{\delta}_-) + \gamma \hat{c}_{шт} \times \\ & \times (x - \tilde{\mu}_- - \tilde{e}_-) + \aleph(i) = (1 + \gamma) \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- + \\ & + \aleph(i) \text{ при } x_{<\mu, \delta>} + \tilde{\mu}_- \leq x \leq x_{<\mu, \delta>} + 2\tilde{\mu}_-; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \max_{\mu \in [\tilde{\mu}_-, \tilde{\mu}_+]} A_{T-i}(x - \mu) = \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_- - \tilde{\mu}_-) + \\ & + \gamma(1 + \gamma) \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_- - \tilde{\mu}_-) - \gamma^2 \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- = (1 + \gamma + \gamma^2) \hat{c}_{шт} \times \\ & \times (x - \tilde{e}_-) - \gamma(1 + \gamma) \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- - \gamma^2 \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- = (1 + \gamma + \gamma^2) \times \\ & \times \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma(1 + 2\gamma) \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- \text{ при } x_{<\mu, \delta>} + 2\tilde{\mu}_- \leq x. \end{aligned}$$

Так как $F_{T-(i+1)}(x) = \min_{u \geq 0} \{A_i(n + u)\}$, то

$$\begin{aligned} & F_{T-(i+1)}(x) = \\ & = \begin{cases} (1 + \gamma) R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i) & \text{при } x \leq x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \gamma R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i) & \text{при } x_{<\mu, \delta>} \leq x \leq x_{<\mu, \delta>} + \tilde{\mu}_-, \\ (1 + \gamma) \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- + \aleph(i) & \text{при } x_{<\mu, \delta>} + \tilde{\mu}_- \leq x \leq 2\tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>}, \\ (1 + \gamma + \gamma^2) \hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma(1 + 2\gamma) \hat{c}_{шт} \tilde{\mu}_- & \text{при } \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>} \leq x; \end{cases} \end{aligned}$$

$$A_{T-(i+1)}(x) = R_{<\delta>}(x) + \gamma F_{T-(i+1)}(x).$$

Таким образом, получим:

$$A_{T-(i+1)}(x) = \begin{cases} ((\hat{c}_{шт} - c_{out})(x - \tilde{\delta}_+) + \gamma[(1 + \gamma)R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i)]) \\ \text{при } x \leq x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma[(1 + \gamma)R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i)] \\ \text{при } x_{<\mu, \delta>} \leq x \leq x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma\hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) + \aleph(i) \\ \text{при } x_{<\mu, \delta>} \leq x \leq \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>}, \\ \hat{c}_{шт}(x - \tilde{\delta}_-) + \gamma(1 + \gamma)\hat{c}_{шт}(x - \tilde{e}_-) - \gamma^2\hat{c}_{шт}\tilde{\mu}_- \\ \text{при } \tilde{\mu}_- + x_{<\mu, \delta>} \leq x. \end{cases}$$

Тогда $\gamma[(1 + \gamma)R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i)] = \gamma R_{s<\mu, \delta>} + \aleph(i + 1)$, преобразуем $\aleph(i + 1) = \gamma^2 R_{s<\mu, \delta>} + \gamma \aleph(i)$ и $\aleph(i) = \gamma^2 R_{s<\mu, \delta>} \frac{1 - \gamma^{i-1}}{1 - \gamma}$. Это выражение позволяет получить минимаксное значение целевой функции $F_i(x_{<\mu, \delta>}) = (1 + \gamma + \gamma^2 \frac{1 - \gamma^{(T-i)-1}}{1 - \gamma}) R_{s<\mu, \delta>}$, а для стационарного случая $F_\infty(x_{<\mu, \delta>}) = \frac{1}{1 - \gamma} R_{s<\mu, \delta>}$.

Выражения для $A_i(x)$ и $F_i(x)$ позволяют получить минимаксную стратегию управления в условиях интервальной неопределенности, сформулируем ее. Величины n , u , μ и δ являются целочисленными, а значение $x_{<\mu, \delta>} = \alpha_{шт, out} \tilde{e}_- + (1 - \alpha_{шт, out}) \tilde{e}_+$ может не быть целым. Поэтому найдем целое число $x_{шт}$, обеспечивающее минимальное значение $A_i(x)$ на множестве целых x для всех t :

$$x_{шт} = \arg\{\min_T \{A_i([x_{<\mu, \delta>}]), A_i([x_{<\mu, \delta>} + 1])\}\}.$$

Тогда минимаксная стратегия получится в виде $u_{opt}(n) = \max_T \{0, x_{шт} - n\}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. De Smet A., Lund S., Schaninger W. Organizing for the future. Platform-based talent markets help put the emphasis in human-capital management back where it belongs — on humans. January 2016. — URL: http://www.mckinsey.com/insights/organizing/organizing_for_the_future (дата обращения 1.10.2016).
2. Белов М.В. Модель управления человеческим капиталом фирмы // Проблемы управления. — 2016. — № 5. — С. 24—34.
3. Smith D.K. Dynamic programming and inventory management: what has been learnt in the last generation? // Proceedings of the 1999 ISIR Workshop on Inventory Management. Exeter. — UK, 1999.
4. Rao P. A Dynamic Programming Approach to Determine Optimal Manpower Recruitment Policies // The Journal of the Operational Research Society. — 1990. — Vol. 41, iss. 10. — P. 983—988.
5. Chen J.J., Zhu J.L., Zhang D.N. Multi-project scheduling problem with human resources based on dynamic programming and staff time coefficient // Intern. Conf. on Management Science & Engineering / 21th Annual Conference Proceedings. — Helsinki, 2014. P. 1012—1018. — URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6930339&isnumber=6930197> (дата обращения 1.10.2016).

6. Silva L.C., Costa A.P.C.S. Decision model for allocating human resources in information system projects // Intern. Journal of Project Management. — 2013. — Vol. 31. — P. 100—108.
7. Elshafei M., Alfares H.K. A dynamic programming algorithm for days-off scheduling with sequence dependent labor cost // Journal of Scheduling. — 2008. — Vol. 11, iss. 2. — P. 85—93. — URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10951-007-0040-x> (дата обращения 1.10.2016).
8. Xiea Y., Liua C., Wu D., et al. Dynamic programming based research position planning: Empirical analysis from the Chinese Academy of Sciences // Procedia Computer Science. — 2015. — Vol. 55. — P. 35—42.
9. Si J., Barto A., Powell W.B. and Wunsch, D. Approximate Dynamic Programming for High-Dimensional Resource Allocation Problems / in Handbook of Learning and Approximate Dynamic Programming. — Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004. — doi: 10.1002/9780470544785.ch10.
10. Nirmala S., Jeeva M. A dynamic programming approach to optimal manpower recruitment and promotion policies for the two grade system // African Journal of Mathematics and Computer Science Research // December 2010. — Vol. 3, iss. 12. — P. 297—301.
11. Mehlmann A. An Approach to Optimal Recruitment and Transition Strategies for Manpower Systems Using Dynamic Programming // The Journal of the Operational Research Society. — 1980. — Vol. 31, N 11. — P. 1009—1015.
12. Berovic D.P., Vinter R.B. The Application of Dynamic Programming to Optimal Inventory Control // IEEE Trans. on Automatic Control. — 2004. — Vol. 49, N 5. — P. 676—685.
13. Ibrahim R., Armony M., Bassamboo A. Does the Past Predict the Future? The Case of Delay Announcements in Service Systems // Management Science / Published online in Articles in Advance 13 Jun 2016. — URL: <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.2016.2425> (дата обращения 1.10.2016).
14. Gans N., Koole G., Mandelbaum A. 2003 Telephone Call Centers: Tutorial, Review, and Research Prospects // Manufacturing & Service Operations Management. — 2003. — Vol. 5, N 2. — doi: 10.1287/msom.5.2.79.16071.
15. Lee A.M., Longton P.A. Queueing Processes Associated with Airline Passenger Check-in // Journal of the Operational Research Society. — 1959. — Vol. 10, iss. 1. — P. 56—71. — doi:10.1057/jors.1959.5.
16. Espinosa E.D., Frausto J., Rivera E.J. Markov Decision Processes for Optimizing Human Workflows // Service Science. — 2010. — Vol. 2, iss. 4. — P. 245—269. — URL: <http://dx.doi.org/10.1287/serv.2.4.245> (дата обращения 1.10.2016).
17. Badinelli R. A Stochastic Model of Resource Allocation for Service Systems // Service Science. — 2010. — Vol. 2, iss. 1—2. — P. 76—91. — URL: http://dx.doi.org/10.1287/serv.2.1_2.76 (дата обращения 1.10.2016).
18. Arts J., Basten R., Van Houtum G.-J. Repairable Stocking and Expediting in a Fluctuating Demand Environment: Optimal Policy and Heuristics // Operations Research / Published online in Articles in Advance 01 Jun 2016. — URL: <http://dx.doi.org/10.1287/opre.2016.1498> (дата обращения 1.10.2016).
19. Flamholtz E.G., Geis G.T., Perle R.J. A Markovian Model for the Valuation of Human Assets Acquired by an Organizational Purchase // Interfaces. — 1984. — Vol. 14, N 6. — P. 11—15.
20. Cao H., Hu J., Jiang C., Kumar T., et al. On the Mark: Integrated Stochastic Resource Planning of Human Capital Supply Chains // Interfaces. — Vol. 41, N 5. — P. 414—435. — URL: <http://dx.doi.org/10.1287/inte.1110.0596> (дата обращения 1.10.2016).
21. Kumar P., Varaiya P. Stochastic Systems: Estimation, Identification, and Adaptive Control. — New Jersey: Prentice Hall, Inc.; Englewood Cliffs, 1986. — 358 p.
22. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 1989. — 263 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.С. Манделем.

Белов Михаил Валентинович — канд. техн. наук, зам. ген. директора, компания ИБС, г. Москва, mbelov59@mail.ru.



ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОТБОРА КОМАНДЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА

А.З. Асанов, И.Ю. Мышкина

Рассмотрена возможность применения различных типов нейронных сетей для оценки и отбора исполнителей для реализации задач проекта. Для получения частных оценок соответствия компетенций исполнителей требованиям к отдельным задачам проекта и формирования обучающей выборки предложено использовать когнитивные карты. Приведены методика сбора и обработки необходимых экспертных оценок. Отмечено, что методика может применяться для определения параметров когнитивной карты и оценок компетенций возможных исполнителей. Для согласования мнений экспертов применен алгоритм согласования кластеризованных ранжировок.

Ключевые слова: проект, компетенция, когнитивная карта, нейронные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи управления кадрами предприятия/организации по степени важности стоят в одном ряду с задачами производства и сбыта продукции. Успешность нового проекта в любой сфере деятельности напрямую зависит от компетентности выбранных исполнителей, от того, правильно ли распределены между членами команды отдельные задачи проекта. Большинство работ, касающихся вопросов формирования команд исполнителей, нацелены, прежде всего, на получение интегральных оценок соответствия профессиональных, психолого-личностных и других характеристик соискателей требованиям отдельных заданий на основе результатов тестирования профессиональных знаний, психологического тестирования, экспертных оценок и т. п. Далее на основе полученных данных о соискателях определяется такой состав команды, чья оценка соответствия требованиям к участию в проекте доставляет экстремальное значение некоторой целевой функции, учитывающей значения выбранных критериев оценки потенциальных соискателей. Подобные задачи в теории оптимизации относятся к дискретной (комбинаторной) оптимизации и называются задачами о назначениях. При этом не учитывается имеющаяся информация, если она есть, об уже реализованных проектах, которая позволяет получить более четкую

картину о возможностях сотрудников проектной организации, их компетенциях в реальной практической работе и об особенностях проектов, в которых сотрудники могут участвовать. Ценность данной информации значительно увеличивается при отсутствии универсальных подходов к оценке реальных компетенций сотрудников и ориентации существующих методик на оценку только «знаниевого» компонента компетенций на основе применения тестовых заданий.

Данные об уже реализованных проектах, как удачных, так и проектов, трудности в реализации которых были обусловлены недостаточной компетентностью исполнителей, могут использоваться при оценке новых проектов и отборе наиболее подходящих исполнителей. Для анализа имеющейся ретроспективной информации предлагается применить аппарат нейронных сетей. Искусственные нейронные сети широко применяются для решения задач прогнозирования, распознавания образов, аппроксимации, классификации, принятия решений и управления. В частности, в задачах управления персоналом нейросетевые модели чаще всего используются при решении таких задач, как прогнозирование успешности персонала в компании в процессе найма; оценка результативности труда управленческого персонала; выявление предпочтений агентов [1]. При решении задачи о распределении задач между исполнителями, сформулированной как задача дискретной опти-

мизации, используют дискретные и непрерывные сети Хопфилда [2, 3].

В настоящей работе рассматриваются три различные задачи, возникающие при отборе исполнителей для реализации проектов.

- Оценка степени соответствия компетенций возможных исполнителей требованиям к уровням компетенций, необходимых для решения каждой частной задачи проекта. Предполагалось, что для каждой задачи требуется один исполнитель. Для нахождения оценки соответствия компетенций возможных исполнителей требованиям к уровням компетенций, необходимых для решения каждой отдельной задачи проекта, предлагается использовать когнитивные карты. На основе полученных оценок и оценок занятости исполнителей в других работах и/или проектах может быть осуществлен отбор наиболее подходящих исполнителей из числа потенциально возможных.

- Отбор наиболее соответствующих требованиям исполнителей для реализации каждой из задач проекта на основе истории уже реализованных «удачных» проектов с помощью многослойного персептрона.

- Оценка возможности неуспешной реализации проекта на основе истории уже реализованных проектов с помощью нейронной сети Хопфилда. При этом учитывались только проекты, проблемы с реализацией которых были обусловлены недостаточной компетентностью исполнителей.

1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо сформировать команду из m человек и распределить между ними m задач, каждая из которых требует владения определенным набором компетенций, из n возможных исполнителей таким образом, чтобы оценка соответствия их компетенций требованиям была не ниже некоторой минимальной оценки.

Для получения частных оценок составляющих компетенций предлагается использовать экспертные оценки. В качестве экспертов могут выступать линейные руководители, а также руководители отдельных уже реализованных проектов, т. е. те, кто непосредственно участвует в работе и тесно взаимодействует с потенциальными исполнителями.

Решение поставленной задачи предполагает выполнение двух этапов.

Этап 1. Получение интегральных оценок соответствия n возможных исполнителей проекта требованиям m заданий $Q = \{q_i^j\}$, $i = 1, m, j = 1, n$, $q_i^j \in [0, 1]$ на основе экспертных оценок составляющих компетенций.

Этап 2. Отбор на основе оценок, полученных на этапе 1 по одному исполнителю для реализации каждой задачи проекта при условии, что отобранные исполнители имеют наиболее подходящую оценку соответствия требованиям.

2. ОЦЕНКА КОМПЕТЕНЦИЙ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

2.1. Когнитивные карты для оценки компетенций

Рассмотрим возможность применения когнитивных карт [4, 5] для получения оценки соответствия исполнителя требованиям для реализации задачи проекта.

Когнитивная модель требований к реализации частного задания проекта:

$$\Phi = \langle G, Y, W \rangle,$$

где $G = \langle V, E \rangle$ — ориентированный граф;

V — множество вершин, причем $V = \{V_l\} = \{K_l\} \cup \{SK_l^i\} \cup \{S\}$;

K_l — вершины-компетенции;

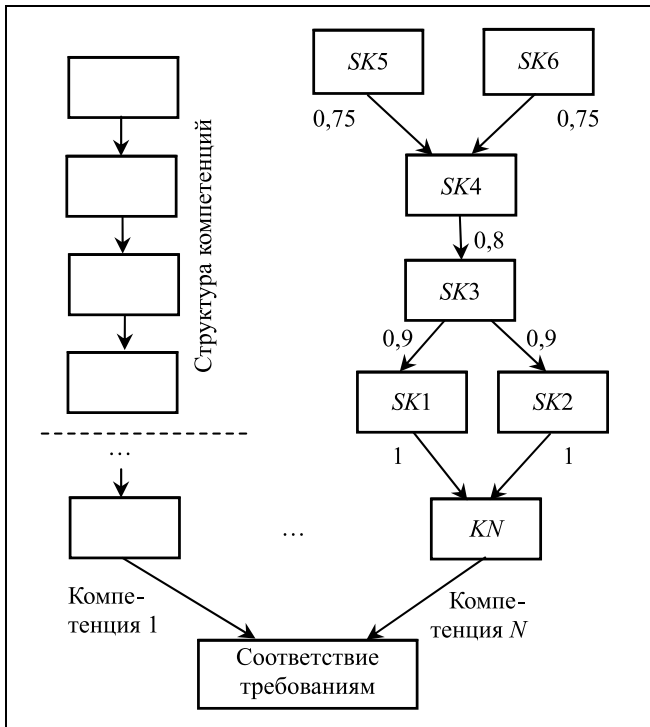
SK_l^i — вершины-составляющие i -й компетенции, $i = \overline{1, N}$ (N — общее число компетенций), $t_i = \overline{1, m_i}$ (m_i — общее число составляющих i -й компетенции), вершина S — «соответствие требованиям задания»;

$E = \{e_{ij}\}$, $i, j = \overline{1, M}$ — множество дуг (таким образом, общее число вершин $M = N + \sum_{i=1}^N m_i + 1$);

$Y = \{Y^l\}$, $l = \overline{1, M}$ — множество параметров вершин V (значение вершин K и SK — оценка компетенций и составляющих компетенций потенциального исполнителя, значение вершины S — интегральная оценка соответствия требованиям).

Веса влияний $W = \{w_{ji}\}$, $i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, M}$, между каждой парой вершин принимают значения из промежутка $(0, 1]$. Веса устанавливались равными значимости вершины для выполнения задания. Напрямую с вершиной-компетенцией связаны составляющие этой компетенции, имеющие наибольшую значимость. Остальные вершины-составляющие связаны друг с другом от менее значимой к более значимой. Такое расположение вершин обусловлено тем, что для выполнения задания требуется, чтобы возможный исполнитель владел всем набором компетенций и их составляющих.

Требуется на основе оценок составляющих компетенций соискателя получить оценку соответст-



Когнитивная карта требований к компетенциям

вия соискателя требованиям, необходимым для выполнения задания проекта.

Решение задачи оценки компетенций включает в себя этапы:

- построение когнитивной модели требований к компетенциям;
- задание начальных значений вершин-составляющих компетенций;
- пересчет значений всех вершин.

Модель этапов вычислений когнитивной карты:

$$Y_i(t+1) = Y_i(t) + \sum_{j=1}^M \Delta Y_j(t) w_{ji} \text{ — для результирующей вершины } S;$$

где $\Delta Y_j(t)$ — приращение (изменение) значения j -й вершины на этапе вычисления t ;

$\Delta Y_j(t)$ — приращение (изменение) значения j -й вершины на этапе вычисления t ;

$$Y_i(t+1) = Y_i(t) + \sum_{j=1}^M \Delta Y_j(t) w_{ji} H(Y_j(0)),$$

где $H(x) = 0$, если $x < \eta(SK)$, и $H(x) = 1$,

если $x \geq \eta(SK)$ — (1)

для вершин, представляющих компетенции и их составляющие, где $\eta(SK)$ — минимально возможная оценка составляющих компетенций. Ограничения в данном случае введены для того, чтобы учитывать все составляющие компетенции при оценке возможного исполнителя только в случае,

если он обладает всеми составляющими компетенций на уровне не ниже минимального. При этом даже очень высокая оценка по какой-либо составляющей не увеличит значительно итоговую оценку возможного исполнителя, если он не соответствует всему набору требований.

На рисунке приведен пример когнитивной карты требований к компетенциям для реализации некоторого задания проекта. В табл. 1 дана расшифровка одной из компетенций.

Обозначения на рисунке: KN (компетенция) — «Способность демонстрировать, применять, критически оценивать и пополнять математические знания»; SK — составляющие компетенции: «разрабатывает математические модели реальных процессов и ситуаций ($SK1$); оценивает различные методы решения задачи и выбирает оптимальный метод ($SK2$); способен передавать результат проведенных исследований в виде конкретных рекомендаций ($SK3$); применяет компьютерные математические программы при решении задач ($SK4$); оценивает математическую корректность различной информации в СМИ, научно-популярной литературе и других источниках в терминах предметной области знания ($SK5$); готов и способен к обучению и саморазвитию в предметной области знания ($SK6$)».

В табл. 1 для оценки компетенции N , граф составляющих частей для которой представлен на рисунке, приняты веса влияний — $w_{1KN} = w_{2KN} = z(SK_1^N) = z(SK_2^N) = 1$, $w_{31} = w_{32} = z(SK_3^N) = 0,9$, $w_{43} = z(SK_4^N) = 0,8$, $w_{54} = w_{64} = z(SK_5^N) = z(SK_6^N) = 0,75$; начальные значения вершин, представляющих составляющие компетенции, $Y_i(0) = \{0,5; 0,5;$

Таблица 1

Параметры составляющих компетенции

Структура компетенции	Значимость, $z(SK_{t_N}^N)$	Минимальная оценка составляющих компетенции $\eta(SK_{t_N}^N)$
$SK1$	1	0,5
$SK2$		
$SK3$	0,9	0,4
$SK4$	0,8	
$SK5$	0,75	
$SK6$		0,3
Итоговая оценка		6,464

Таблица 2

**Результаты расчетов
для нескольких возможных исполнителей**

Составляющие компетенции	Некоторые комбинации частных оценок					
	Исполнители					
	1	2	3	4	5	6
SK1	0,5	1	0,4	0,4	0,5	0,8
SK2				0,5		0,7
SK3						
SK4	0,4	0,3	0,3			
SK5			0,4			
SK6	0,3		0,2	0,3	0,3	
Итоговая оценка	6,5	14,8	0	3,23	3,8	10,6
Нормированная оценка	0,44	1		0,22	0,26	0,71

0,5; 0,4; 0,4; 0,3}; минимальная оценка составляющих компетенции $\eta(SK_i^N) = Y_i(0)$. В результате расчетов по формуле (1) получаем значение вершины KN , равное 6,464.

Табл. 2 содержит результаты расчетов для нескольких возможных исполнителей. Итоговая оценка рассчитана по формуле (1). В табл. 2 каждому из шести исполнителей соответствует своя комбинация оценок составляющих компетенции, которые принимаются за начальные значения соответствующих вершин графа. Минимальные оценки составляющих компетенции и значимости составляющих компетенции те же, что и в табл. 1. В табл. 2 нормированная оценка получена делением итоговой оценки на максимально возможную (при максимальной оценке составляющих компетенции, равную 1), т. е. в данном случае делением на 14,8.

Когнитивные карты позволяют получать итоговую оценку соответствия исполнителя требованиям задания на основе частных оценок компетенций, позволяя при этом учитывать минимальные допустимые оценки составляющих компетенций, причем даже очень высокая оценка по какой-либо составляющей не увеличит значительно итоговую оценку возможного исполнителя, если он не соответствует всему набору требований. Кроме того, описанная структура когнитивной карты позволяет увеличивать итоговые оценки в случае наличия у исполнителя определенных сочетаний компетенций, оценки которых не ниже заданного минимального порога.

2.2. Обработка экспертных оценок

При оценке весов связей между вершинами и оценке составляющих компетенций возможных исполнителей используются экспертные оценки. Сбор и обработка экспертных оценок включает в себя следующие этапы (на примере оценок весов связей, которые соответствуют значимости компетенций и их составляющих):

- 1) экспертами определяются веса связей между вершинами когнитивной карты;
- 2) определяются средние арифметические веса;
- 3) определяются медианы наборов весов;
- 4) средние веса и их медианы задают некоторые ранжировки множества компетенций (и составляющих);
- 5) применяется алгоритм согласования двух полученных кластеризованных ранжировок [6], если присутствуют противоречивые наборы компетенций, то экспертам предлагается снова провести их оценку.

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда три эксперта проводят оценки значимости семи компетенций. Возможные результаты этапов 1—4 обработки экспертных оценок приведены в табл. 3.

На основе полученных результатов получаем две ранжировки компетенций (в табл. 3 наименьшему значению значимости приписывается ранг 1): на основе средних значений — $A = [1 < 2 < 3 < 4 < 5 < 6 < 7]$, на основе медиан — $B = [1 < 3 < 2 < 4 < \{5, 6\} < 7]$. Совокупность противоречивых пар компетенций — $S = [(2, 3), (5, 6)]$. Результат согласования кластеризованных ранжировок: $f(A, B) = [1 < \{2, 3\} < 4 < \{5, 6\} < 7]$.

Таким образом, дополнительного изучения в целях упорядочения и получения новых оценок

Таблица 3

Пример результатов обработки экспертных оценок

	Степень влияния (значимость) на общую оценку соискателя (значения от 0 до 1)						
	Компетенция						
	1	2	3	4	5	6	7
Эксперт 1	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1
— " — " — 2	0,5	0,7	0,6	0,8	0,9	1	0,9
— " — " — 3	0,7	0,8	0,9	0,9	1	0,9	1
Среднее	0,5	0,63	0,67	0,8	0,9	0,93	0,97
Медиана		0,7	0,6			0,9	1
Ранги средних	1	2	3	4	5	6	7
Ранги медиан		3	2			5,5	5,5



значимости требуют только компетенции {2, 3} и {5, 6}.

В случае большого числа оцениваемых экспертами объектов можно предварительно провести проверку согласованности мнений одного эксперта, которая включает в себя три этапа.

1) Эксперту предлагается компетенции и/или их составляющие разбить на кластеры (группы) по значимости: «низкая значимость», «средняя», «высокая», «очень высокая».

2) Внутри каждой группы провести ранжировку по возрастанию их значимости.

3) Применяется алгоритм согласования [6] полученной ранжировки и ранжировки прямых оценок компетенций, данных экспертом. Если присутствуют противоречивые наборы компетенций, то экспертам предлагается снова провести оценку этих компетенций.

Применение ранжировок и описанных методов их анализа обусловлено следующими причинами.

- Непосредственное использование только ранжировок при оценке значимостей компетенций, когда эксперту предлагается только проранжировать компетенции (с последующей обработкой рангов с помощью, например, определения коэффициентов Фишборна) без указания конкретных оценок значимости в случае большого числа компетенций для эксперта может стать очень трудоемким процессом и вызвать большое число ошибок. Указание же конкретных оценок значимости более естественно.
- Использование ранжировок позволяет осуществлять проверку согласованности мнений экспертов и согласованность мнений одного эксперта, исключая возможность появления случайных ошибок.

3. НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ХОПФИЛДА ДЛЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

Следующий этап — отбор наиболее подходящих исполнителей на основе полученных оценок и оценок степени занятости исполнителей в других работах и/или проектах.

Постановка задачи. Имеются оценки соответствия n возможных исполнителей проекта требованиям m заданий $Q = \{q_{ij}\}$, $i = 1, m, j = 1, n, q_{ij} \in [0, 1]$. Требуется отобрать по одному исполнителю для реализации каждой задачи проекта, отобранные исполнители должны иметь наибольшую оценку соответствия требованиям. В итоге получаем оптимизационную комбинаторную задачу. Для решения подобных задач при большом числе возможных вариантов распределения заданий между

исполнителями используется нейронная сеть Хопфилда [7–9].

Классическая задача о назначениях формулируется следующим образом: пусть имеется n работ и n претендентов на выполнение этих работ. Назначение претендента на работу j связано с затратами c_{ij} , $i, j = \overline{1, n}$. Требуется определить назначение, дающее минимальные суммарные затраты, при этом каждого претендента можно назначить только на одну работу, и каждая работа может быть занята только одним кандидатом [10, 11]. Данная задача относится к задачам дискретной оптимизации и является частным случаем транспортной задачи.

Для задачи о назначениях и ее различных разновидностей характерна большая сфера применимости при решении разнообразных прикладных задач. К ним сводятся задачи, связанные с оптимальным распределением элементов на микросхемах, задачи планирования работы вычислительных, производственных систем, оптимизации перевозок, а также задачи составления расписаний [12, 13].

Для задачи о назначениях существуют точные методы решения, такие как венгерский алгоритм, метод потенциалов, метод ветвей и границ, метод динамического программирования. Однако при большой размерности задачи данные методы требуют значительных затрат времени [11–13]. Известные методы часто становятся неприменимы и в случаях использования модифицированных моделей задачи о назначениях, в частности, при добавлении новых нестандартных ограничений, а также появлении многокритериальности [13]. В этих условиях могут применяться и приближенные методы решения задачи дискретной оптимизации. При решении подобных задач часто используют нейронные сети Хопфилда, которые позволяют найти решение в реальном времени и время нахождения решения мало зависит от размерности задачи [12].

Нейросетевая постановка задачи. Сеть для решения задачи строится следующим образом: каждый нейрон снабжается двумя индексами: первый соответствует заданию проекта, второй — номер возможного исполнителя. Функция энергии в терминах нейронной сети Хопфилда с бинарными состояниями нейронов $x_{ij} \in \{0, 1\}$, $i = 1, m, j = 1, n$, и дискретным временем для классической задачи оптимизации может иметь вид [2]:

$$E = \frac{\alpha}{2} \sum_i \left(\sum_j x_{ij} - 1 \right)^2 + \frac{\beta}{2} \sum_j \left(\sum_i x_{ij} - 1 \right)^2 + \chi \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij} \quad (2)$$

или

$$E = \frac{\alpha}{2} \sum_t \sum_i \sum_{i \neq j} x_{ti} x_{tj} + \frac{\beta}{2} \sum_i \sum_t \sum_{y \neq t} x_{ti} x_{yi} + \\ + \frac{\gamma}{2} \left(\left(\sum_t \sum_i x_{ti} \right) - m \right)^2 + \chi \sum_t \sum_i c_{ti} x_{ti}.$$

При отборе исполнителей для реализации каждой задачи проекта с наибольшей оценкой соответствия требованиям и минимальной оценкой степени занятости исполнителей $S = \{s_i\}$, $i = 1, m$, $s_i \in [0, 1]$ функция энергии может иметь вид:

$$E = \frac{K_1}{2} \sum_t \sum_i \sum_{i \neq j} x_{ti} x_{tj} + \frac{K_2}{2} \sum_i \sum_t \sum_{y \neq t} x_{ti} x_{yi} + \\ + \frac{K_3}{2} \left(\left(\sum_t \sum_i x_{ti} \right) - m \right)^2 + \frac{K_4}{2} \sum_t \left(\sum_i x_{ti} q_{ti} - 1 \right)^2 + \\ + K_5 \sum_t \sum_i x_{ti} s_i.$$

В этом выражении:

- первое слагаемое равно нулю только в том случае, если каждая строка (задание) содержит не более одной единицы (каждое задание выполняет один исполнитель);
- второе слагаемое равно нулю только в том случае, если каждый столбец (возможный исполнитель) содержит не более одной единицы (каждый исполнитель выполняет только одно задание);
- третье слагаемое равно нулю только в том случае, если матрица содержит ровно m единиц (число исполнителей равно числу заданий);
- четвертое слагаемое принимает минимальное значение, если отобранные исполнители в наибольшей степени соответствуют требованиям;
- пятое слагаемое принимает минимальное значение, если отобранные исполнители в наименьшей степени заняты.

В результате находим элементы весовой матрицы:

$$w_{ii, yj} = -K_1 \delta_{ty} (1 - \delta_{ij}) - K_2 \delta_{ij} (1 - \delta_{ty}) - K_3 - \\ - 2K_4 q_{ti} q_{yj} \delta_{ty} (1 - \delta_{ij}),$$

Таблица 4

Процент правильных решений

Отличие найденного решения от оптимального, менее, %	Доля правильных решений, %
1	52
10	72
20	79
30	86

где $\delta_{ij} = 1$, если $i = j$ и $\delta_{ij} = 0$ в противном случае. Значения главной диагонали матрицы весов сети Хопфилда были обнулены для повышения устойчивости работы сети.

Кроме того, каждый нейрон имеет дополнительный вход со смещающим весом $b_i = K_3 m + K_4 q_{ij} - K_5 s_j$, где $i = tn + j$.

Уровень активации нейронов сети может вычисляться как [2]

$$y_j = \sum_{i \neq j} w_{ij} z_i + b_j.$$

В качестве функции активации F для нейронов сети для дискретной сети Хопфилда с дискретным временем используется пороговая функция

$$z_j = F(y_j) = \begin{cases} 1, & \text{если } y_j > 0, \\ 0, & \text{если } y_j \leq 0, \end{cases}$$

где $z_j(z_j(0))$ фактически представляет собой входной сигнал) — выходные значения нейронной сети.

Из соображений устойчивости сети применяется асинхронная динамика работы [2].

Эксперимент проводился 100 раз для $m = 3$ и $n = 7$, элементы матриц $C = \{c_i^j\}$ и $S = \{s_i\}$ генерировались случайным образом. Каждый опыт повторялся 7 раз для различных случайных значений входных нейронов. Значения нейронов менялись последовательно.

Результаты расчетов для значений коэффициентов $K = [0,117 \ 0,651 \ 0,102 \ 0,943 \ 1,959]$ приведены в табл. 4. В первом столбце табл. 4 приведены проценты отклонений значений целевой функции (2) ($E_{\text{получ}}$) для полученных с помощью сети Хопфилда решений от точных минимальных значений целевой функции (2) (E_{min}): $\frac{|E_{\text{получ}} - E_{\text{min}}|}{E_{\text{min}}}$.

Доля правильных решений значительно возрастает в случае непрерывной сети Хопфилда с дискретным и непрерывным временем [2, 3, 9, 14], и получаемые результаты становятся вполне приемлемыми.

4. ОТБОР КОМАНДЫ НА ОСНОВЕ ИСТОРИИ С ПОМОЩЬЮ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРСЕТРОНА

Сведение задачи отбора команды для решения задачи отбора команды для реализации проекта к задаче оптимизации возможно при наличии адекватных оценок соответствия возможных исполнителей проекта требованиям заданий. Однако получение подобных оценок представляет собой



отдельную трудоемкую задачу, при этом не всегда возможно учесть и предусмотреть необходимость учета всех факторов (компетенций, психологических характеристик: трудоспособность, волевые качества и т. п., социальных факторов), влияющих на успешность реализации отдельных задач проекта конкретным исполнителем. В этих условиях становится целесообразным учет истории об уже реализованных «удачных» проектах.

Допустим, имеются сведения об уже реализованных организацией «удачных» проектах, данные о которых представлены требованиями к уровню компетенций, потребовавшихся для их реализации (низкий, средний, высокий) и сотрудниках, участвовавших в реализации проекта.

Формально механизм формирования группы сотрудников для реализации проекта можно представить как механизм распознавания: на основе имеющейся «истории» произведенных работ, на основании степени близости вектора требований к компетенциям для нового проекта к требованиям к уже реализованным проектам можно определить оптимальный состав команды для нового проекта. Другими словами, необходимо решить задачу аппроксимации отображения, которое входному вектору требований к компетенциям для проекта ставит в соответствие группу сотрудников, способных успешно реализовать данный проект.

Для решения задачи формирования группы сотрудников для реализации проекта нами для нейросетевой аппроксимации использовалась двухслойная однородная однонаправленная сеть (многослойный персептрон) с сигмоидальными функциями активации.

Нейросетевая постановка задачи. Имеется множество уже реализованных проектов (входных данных), представленных набором компетенций, необходимых для их реализации $K = (k_1^1, k_1^2, k_1^3, \dots, k_n^1, k_n^2, k_n^3)$, где n — общее число компетенций, которыми обладают сотрудники, $k_i^j, k_i^j \in \{0, 1\}$ — j -й уровень, $j \in \{1, 2, 3\}$, i -й компетенции, $i = 1, n$, и множество возможных ответов — выходных данных (состав сотрудников, участвующих в реализации проектов — $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, m — общее число сотрудников, $s_i \in \{0, 1\}$, $i = 1, m$). Можно предположить, что между набором компетенций и составом команды имеется некоторая неизвестная зависимость. На основе имеющихся данных о уже реализованных «удачных» проектах требуется восстановить эту зависимость с помощью двухслойного персептрона (число входов $3n$, число выходов m). Использование сигмоидальных функций активации обусловлено тем, что входной и выходной век-

торы состоят только из нулей и единиц, область же значений сигмоидальной функции представляет собой интервал $(0, 1)$; сигмоидальные функции часто используют при реализации логических функций [15]; кроме того, существование непрерывных производных первого и второго порядка у данной функции позволяют применять разнообразные алгоритмы обучения нейронной сети.

Генеральная совокупность была смоделирована и состояла из 53 примеров: случайным образом были сгенерированы компетенции из 10 возможных, которыми владеют 10 сотрудников и 53 проекта, в которых эти сотрудники могли бы участвовать. Рассматривались компетенции только на одном уровне (владеет/не владеет).

Для оценки числа нейронов в скрытых слоях однородных нейронных сетей можно воспользоваться формулой для оценки необходимого числа синаптических весов L_w в многослойной сети с сигмоидальными функциями активации [16]:

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_w \leq m \left(\frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m,$$

где n и m — размерности входного и выходного сигналов, N — число элементов обучающей выборки. Тогда число нейронов в двухслойной сети $L = L_w / (n + m)$.

В нашем случае ($m = 10$, $n = 10$, $N = 53$) получим возможное число нейронов в скрытом слое: $4 \leq L \leq 67$.

В процессе определения числа нейронов в скрытом слое выбирался также лучший алгоритм обучения нейросети по минимальному значению среднеквадратичной ошибки. Для каждого набора параметров нейросети обучение проводилось по 2–3 раза. Полученные результаты приведены в табл. 5. Расчеты производились средствами «Neural Network Toolbox» пакета «Matlab».

Обозначения в табл. 5: MSE — средняя квадратическая ошибка, Epochs — число циклов обучения, traingr — алгоритм упругого обратного распространения, trainscg — метод шкалированных связанных градиентов, trainlm — метод Левенберга — Маркара (Levenberg — Marquardt).

Наилучшие результаты получены в случае 20 нейронов при методе Левенберга — Маркара.

Основная трудность при решении задач аппроксимации с помощью нейронных сетей заключается в получении обучающей выборки. В случае рассматриваемой задачи выборка может быть увеличена на основе генерации обучающих примеров с помощью когнитивной карты требований к реализации частного задания проекта. Частные задания проекта могут быть сформированы случайным

Результаты обучения нейронной сети

Число нейронов	Trainrp		Trainseg		Trainlm	
	MSE	Epochs	MSE	Epochs	MSE	Epochs
7	0,0585	1286	0,0472	10 000	0,0151	86
10	0,0340	1029	0,0189	1100	0,0094	48
15	0,0264	582	0,0113	372	4,26e-2	22
17	0,0283	549	0,0113	479	1,44e-1	25
20	0,0189	444	0,0038	882	3,45e-2	20
25	0,0170	407	0,0113	689	1,81e-1	19
30	0,0151	414	0,0076	473	7,87e2	18

образом из всего набора компетенций, которыми обладают сотрудники, участвующие в реализации проекта.

Другой возможный подход к применению нейронных сетей для решения задачи аппроксимации при отборе исполнителей для реализации проекта состоит в определении оценки соответствия каждого сотрудника требованиям задания для некоторого набора компетенций, наличие которых требуется для выполнения задания.

5. ОТБОР КОМАНДЫ НА ОСНОВЕ ИСТОРИИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА

Применение многослойного персептрона для решения задачи отбора команды требует наличие достаточной обучающей выборки. Проблема отсутствия выборки достаточного объема может быть решена на основе применения нейронной сети Хопфилда для решения альтернативных задач определения схожести требований нового проекта с требованиями к уже реализованным «удачным» или «неудачным» проектам.

Нейронная сеть Хопфилда обладает ассоциативными свойствами. Задача, решаемая данной сетью в качестве ассоциативной памяти, формулируется следующим образом. Известен набор двоичных сигналов, которые считаются образцовыми. Сеть должна уметь из произвольного неидеального сигнала, поданного на ее вход, выделить (вспомнить по частичной информации) соответствующий образец (если такой есть) или дать заключение о том, что входные данные не соответствуют ни одному из образцов.

Похожая задача возникает при необходимости распознать потенциально неуспешный проект в условиях недостаточной компетентности исполнителей. Набор образцовых сигналов может быть сформирован на основе истории уже реализованных проектов. Соответствующим образом обучен-

ная сеть при подаче на ее вход требований к новому проекту должна выделить соответствующий образец (если такой есть), что будет означать, что вероятность неудачной реализации нового проекта достаточно высока.

В случае небольшого числа уже реализованных удачных проектов нейронная сеть Хопфилда может их «запомнить», а точнее, соответствующие наборы компетенций, и при подаче на вход построенной нейронной сети требований к новому проекту можно определить, есть ли схожие проекты из уже реализованных. Вероятность того, что команда исполнителей, соответствующих найденному образцу, успешно реализует новый проект достаточно высокая.

Число нейронов во входном и выходном слоях нейронной сети Хопфилда для данных задач равно общему числу компетенций, которыми обладают сотрудники. Начальные входные значения в данном случае удобнее принять равными либо +1 (если для реализации проекта необходимо привлечь исполнителя, обладающего соответствующей компетенцией), либо -1 (если такой необходимости нет).

На стадии обучения сети весовые коэффициенты устанавливаются следующим образом [14]:

$$w_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^L (x_i^k)^T \cdot x_j^k, & i \neq j, \\ 0, & i = j, \end{cases} \quad \text{где } x_j^k - j\text{-й элемент } k\text{-го}$$

вектора-образца, который должна «запомнить» сеть, L — число запоминаемых образцов. В качестве функции активации F для нейронов сети можно использовать функцию: $z_j = F(y_j) =$

$$= \begin{cases} +1, & \text{если } y_j \geq 1, \\ -1, & \text{если } y_j \leq -1, \\ y_j & \text{в остальных случаях.} \end{cases}$$



Состояния нейронов определяются по формуле: $z_j(t+1) = F\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}z_i(t)\right)$, $z_i(0) = t_i$, $i = \overline{1, n}$ (t_i — неизвестный входной сигнал).

При подаче на вход сети произвольного вектора сеть может «вспомнить» некоторый образец (путем приведения ее в стабильное состояние) как самый ближайший к предъявленным данным либо не найти подходящий образец.

Число запоминаемых образов образцов не превышает некоторого значения $L_{\max}$, которое зависит от числа n нейронов сети. Точный его расчет затруднен тем обстоятельством, что запоминаемые сетью образцы обычно коррелированы между собой [14]. Для слабо коррелированных образцов известна приближенная оценка [17]: $L_{\max} = \frac{n}{2 \ln n}$.

На практике часто пользуются приближенной оценкой $L_{\max} = 0,15n$ [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована возможность применения нейронных сетей для решения задач формирования команды исполнителей для реализации проекта. Ценность нейронных сетей заключается в том, что они позволяют использовать уже имеющийся опыт проектной деятельности при реализации новых проектов. Для оценки компетенций возможных исполнителей предложено использовать когнитивные карты. Полагаем, что предложенные подходы к оценке компетенций и отбору команды исполнителей могут быть также адаптированы для решения других кадровых задач, связанных с оценкой и расстановкой персонала.

Дальнейшее развитие исследований видится в решении ряда других актуальных задач, связанных с проектной деятельностью, к которым относятся задача формирования перечня задач и компетенций, необходимых для выполнения частных заданий проекта, а также определение числа исполнителей для каждого задания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азарнова Т.В., Степин В.В., Щепина И.Н. Повышение эффективности методов управления развитием персонала на основе нейросетевых моделей и нечетких экспертных технологий // Вестник ВГУ / Сер: Экономика и управление. — 2014. — № 3. — С. 121—130.
2. Меламед И.И. Нейронные сети и комбинаторная оптимизация // Автоматика и телемеханика. — 1994. — № 11. — С. 3—40.

3. Кайнов А.С. Модели и методы решения задачи распределения заданий в мультипроцессорной системе: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Казань: КГТУ, 2009. — 24 с.
4. Асанов А.З., Мышкина И.Ю. Когнитивное моделирование в задаче оценки соответствия соискателя вакансий квалификационным требованиям // Вестник компьютерных и информационных технологий. — 2012. — № 12. — С. 29—34.
5. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 284 с.
6. Горский В.Г., Орлов А.И., Гриценко А.А. Метод согласования кластеризованных ранжировок // Автоматика и телемеханика. — 2000. — № 3. — С. 159—167.
7. Hopfield J.J. and Tank D.W. Neural computation of decisions in optimization problems // Biological Cybernetics. — 1985. — Vol. 52. — P. 141—152.
8. Artificial neural networks for combinatorial optimization / Potvin, Jean-Yves; Smith, Kate Amanda. Handbook of Metaheuristics. Ed. / Fred Glover; Gary A Kochenberger. Massachusetts USA: Kluwer Academic Publishers, 2003. — P. 429—455.
9. Feng G., Douligeris C. Using Hopfield networks to solve assignment problem and N-Queen problem: an application of guided trial an error technique // Proc. of 2nd Hellenic Conference on Artificial Intelligence SETN. — 2002. — P. 325—326.
10. Захарова Е.М., Минашина И.К. Обзор методов многомерной оптимизации // Информационные процессы. — 2014. — Т. 14, № 3. — С. 256—274.
11. Грешин А.А. Математические методы принятия решений. Учеб. пособие для вузов. — М.: Изд-во МГТУ, 2006. — 584 с.
12. Овчинников В.А. Систематизация точных методов дискретной оптимизации // Наука и образование / МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. — 2015. — № 06. — С. 288—304.
13. Медведева О.А. Модели и алгоритмы решения многокритериальных задач о назначениях с дополнительными ограничениями: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Воронеж: ЛГТУ, 2013. — 19 с.
14. Брюхомицкий Ю.А. Нейросетевые модели для систем информационной безопасности. Учеб. пособие. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. — 160 с.
15. Бураков М.В. Нейронные сети и нейроконтроллеры: учеб. пособие. — СПб.: ГУАП, 2013. — 284 с.
16. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. — М.: Физматлит, 2001. — 201 с.
17. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника: Теория и практика: Пер. с англ. — М.: Мир, 1992. — 240 с.
18. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: Пер. с англ. — М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. — 1101 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии П.Ю. Чеботаревым.

Асанов Асхат Замилович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Московский технологический университет МИРЭА, a.z.asanov@yandex.ru,

Мышкина Ирина Юрьевна — ст. преподаватель, Набережночелнинский институт (филиал) Казанского (Приволжского) федерального университета, mirinau@mail.ru.

ЭКСПЕРТНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕМАТЕРИАЛЬНЫМИ АКТИВАМИ С УЧЕТОМ ОЦЕНОК РИСКОВ

В.Б. Гусев, Н.А. Исаева

Разработаны процедуры, предназначенные для анализа последствий взаимодействия нематериальных активов и факторов управления с учетом оценок рисков на основе экспертных данных. Рассмотрен метод анализа, предусматривающий применение рефлексивных процедур вывода для получения транзитивного замыкания оценок взаимодействия и рисков с помощью операций многозначной логики.

Ключевые слова: фактор управления, нематериальный актив, оценка, степень воздействия, риск, транзитивное замыкание, рефлексивная процедура.

ВВЕДЕНИЕ

Нематериальные активы (НМА) играют большую роль в процессах импортозамещения, развитии высоких технологий, инновациях, эффективном использовании интеллектуального багажа [1]. Они служат индикатором научно-технического прогресса (НТП). Однако в качестве объекта управления как единой системы они обычно не рассматриваются.

На уровне предприятия (компании) НМА представляют собой долгосрочные вложения в приобретение прав на имущество, не имеющее материальной формы, но приносящее предприятию доход. К НМА предприятия относятся права пользования земельными участками, природными ресурсами, патенты, лицензии, «ноу-хау», программные продукты, монопольные права и привилегии (включая лицензии на определенные виды деятельности), торговые марки, товарные знаки и др. В экономическом развитии предприятия НМА играют значительную роль.

К НМА причисляют также такие типы активов, как: бренды, знания, технологии, права требований, капитализация рынка, расходы на НИОКР, экспорт и импорт услуг, доля голосов в МВФ, вклад в бюджет ООН и др., актуальные на корпоративном и государственном уровнях. Полный перечень НМА, соответствующий Международной системе финансовой отчетности (МФСО), приводится в работах [1, 2].

Влияние НМА проявляется определенным образом для разных уровней хозяйственной деятельности и для разных горизонтов времени. Так, анализ влияния НМА на деятельность предприятия может основываться на данных бухгалтерского учета. На государственном или межгосударственном уровне аналогичный анализ может использовать данные государственной статистики. При этом характерным интервалом времени для таких компонентов НМА, как например, объекты интеллектуальной собственности (бренды, знания, технологии) могут быть десятки лет. Для импорта и экспорта услуг это месяцы или годы.

Отличительной чертой экспертного подхода при исследовании НМА служит включение в анализ дополнительных факторов, позволяющих достаточно полно определять причинно-следственные связи рассматриваемой системы. Часть используемых данных, основанная на мнении экспертов, может не иметь отражения в официальной статистике, дополняя ее для целей анализа.

Предлагаемую нами классификацию факторов, действующих в сфере нематериальных активов на уровне государства, можно представить в виде схемы, приведенной в табл. 1.

Факторы, действующие в сфере нематериальных активов, включают в себя как собственно НМА, так и объекты, не поддающиеся точному учету, но по существу являющиеся таковыми и оказывающие существенное влияние на объемы НМА. Последние отмечены в таблице знаком «*». Кроме того, при анализе системы управления НМА необ-

ходимо рассматривать внешние (по отношению к НМА) условия, такие как качество управления, масштаб экономики, рост экономики, объем государственного заказа и др., рассматриваемые как возможные инструменты управления и представляющие существенную часть предмета анализа.

Действие одних факторов на другие затрагивает различные аспекты рассматриваемой схемы управления, не всегда детерминировано и при экспертном анализе может характеризоваться степенью влияния и степенью риска (как антипода надежности, достоверности эффекта). В результате сложения эффекта от всех цепочек воздействий, исходящих от каждого фактора-причины и заканчивающихся факторами-следствиями, формируется системный эффект, определяемый полной сово-

купностью прямых и возникающих косвенных связей. Исходная система взаимных влияний в результате рефлексивного наложения всех косвенных воздействий факторов формирует систему полных влияний как их транзитивное замыкание. Отметим, что рассматриваемый метод анализа допускает использование различных исходных данных и, таким образом, обладает определенной универсальностью. Например, процедура транзитивного замыкания применялась в методе анализа денежно-кредитной политики [3].

Исходный этап анализа — подготовка экспертных данных, представляющих первичные оценки параметров взаимовлияния рассматриваемых факторов. Начальный анализ взаимовлияния факторов заключается в исследовании парных взаимодействий [4, 5]. На множестве рассматриваемых факторов выделяются пары, для которых можно представить механизм прямого взаимодействия типа «причина — следствие». Это так называемые «первичные» взаимодействия. Косвенные влияния на этом этапе отсеиваются. Структура прямых связей определяется на основании представлений эксперта об исследуемых процессах. Топология связей и значения оценок уточняются в процессе верификации модели.

Результат анализа — полные (интегральные) оценки параметров взаимовлияний факторов, учитывающие расширенный набор цепочек транзакций. Применяемые в модели оценки представляются в баллах или условных единицах. Для расчетов используются соответствующие операции над оценками, которые можно отнести к алгебре многозначной логики (для оценок влияния) и псевдологики (для оценок рисков).

Для сферы хозяйственной деятельности функции НМА в значительной степени имеют характер информационного действия. Экспертный подход должен учитывать эту особенность, трактуя оценку действия как меру информации, а результаты анализа как носящие качественный или количественный характер.

Задача анализа транзитивного замыкания взаимодействий из рассматриваемой совокупности факторов заключается в получении выводов об эффективности механизмов управления в смысле их воздействия на целевой показатель. Получаемые в результате анализа полные оценки параметров взаимовлияния факторов НМА (степени влияния и рисков) можно использовать при сравнении различных сценариев развития экономики в целях выбора управляющих воздействий при долгосрочном и среднесрочном планировании.

В работе рассмотрены основанные на условных экспертных данных оценки степени влияния и допустимых рисков для макроэкономических

Таблица 1

Классификация факторов сферы нематериальных активов

Факторы влияния в сфере нематериальных активов	
Нематериальные активы	
	Бренды
	Знания, «ноу-хау»*
	Технологии*
	Человеческий капитал*
	Квалификация*
	Предпринимательская активность*
	Климат благоприятствования НТП*
	Международные активы
	Экспорт и импорт услуг
	Международные ценные бумаги
	Вклад в бюджет ООН
	Доля голосов в МВФ
	Прочие нематериальные активы
	Лицензии на осуществление вида деятельности
	Лицензии на осуществление внешне-торговых и квотируемых операций
	Лицензии на использование опыта специалистов
	Права доверительного управления имуществом
	Права требований
	Права пользования природными ресурсами
Стоимостные факторы	
	Цена фирмы
	Капитализация рынка НМА
Отложенные затраты	
	Расходы на НИОКР
	Обучение специалистов
	Реклама
	Патенты

факторов управления НМА, связанных с критерием роста.

Для получения реальных экспертных данных необходима процедура отбора экспертных групп, учитывающая уровень рассматриваемого объекта и доступные для анализа статистические данные. Так, при формировании схемы оценок риска взаимного влияния аспектов НМА реального объекта (предприятия, отрасли, экономики страны) могут быть использованы статистические данные по динамике НМА за определенный период. Относительные приращения объемов соответствующих активов, образующие квадратную матрицу, могут стать отправной точкой для определения оценок рисков взаимного влияния факторов. Эксперт, анализируя эти отношения, выделяет те, которые соответствуют прямым воздействиям одних факторов на другие. Для оценки вероятности риска элементы полученной матрицы нормируются (в предположении, что действия факторов образуют полную группу событий, нормирующим множителем по строке служит величина, обратная сумме ее элементов).

Формирование схемы оценок включает в себя также этап верификации [6], на котором она корректируется в соответствии с опытом эксперта и располагаемыми данными: транзитивное замыкание оценок первичного влияния должно соответствовать соотношениям приращений объемов соответствующих активов за фиксированный период. В процессе работы со схемой уточняются оценки, состав и структура взаимовлияний факторов, а функция эксперта совмещается с функцией аналитика или лица, принимающего решения.

Таким образом, отбор и подготовка экспертов — сложная задача, постановка которой зависит от уровня объекта, объема и структуры располагаемых данных, требований к функциям экспертизы. Ее описание лежит за пределами настоящей работы и составляет предмет дальнейших исследований.

1. ПРОЦЕДУРА РЕФЛЕКСИЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ

Характеристики первичных взаимодействий факторов определяются экспертным путем (например, с помощью балльной оценки или рейтинга). Эффект взаимодействия оценивается положительными и отрицательными (в частности, целыми) числами, отображающими характер и степень влияния факторов друг на друга. Оценки взаимодействия представляют собой нормированные характеристики взаимодействия рассматриваемых факторов, являющиеся аналогом: либо пропускной способности информационных каналов при оцен-

ке степени влияния, либо степени риска при оценке надежности результатов влияния. Эти оценки мы будем интерпретировать как переменные многозначной логики. При расчете оценок косвенных взаимодействий, вообще говоря, следует применять нелинейные операции, определяющие правила действий соответственно для потоковой модели и моделей рисков.

Изменение оценок, определяемое непосредственным влиянием действующих механизмов, будем характеризовать как результат прямых взаимодействий. Наблюдаемые результаты взаимодействий факторов (полные взаимодействия) определяются как прямыми, так и косвенными влияниями.

Любые влияния могут отличаться по степени (интенсивности) и характеру действия. Если факторы образуют цепочку влияний: первый влияет на второй, а второй влияет на третий, такое сочетание будем называть последовательным. Если несколько факторов непосредственно влияют на какой-то другой фактор, такое сочетание влияний будем называть параллельным. Результат последнего определяется свойствами группового воздействия: совместным или дополнительным. При совместном воздействии групповой результат является компенсирующей функцией результатов отдельных воздействий. При дополнительном воздействии его результат определяется исключительно одновременным действием компонентов группы и может быть представлен такой функцией этих компонентов, что отсутствие любой из них приводит к отсутствию результата воздействия.

Схема примитивных взаимодействий факторов представляется экспертной матрицей влияний A . Элемент a_{ij} этой матрицы представляет собой оценку изменения оценки рассматриваемого параметра для фактора j на первичное изменение соответствующей оценки фактора i .

Операции над оценками (компонентами вектора оценок параметров x и матрицы влияний A): логическая сумма $\otimes$ (аналог дизъюнкции, или логической суммы в булевой алгебре), логическое произведение $\otimes$ (аналог конъюнкции, или логического произведения в булевой алгебре).

Результат однократного воздействия факторов переводит изменение Δx их начального вектора состояния x в состояние $y = x \otimes \Delta y$, определяемое как действие логической векторной операции

$$\Delta y = A \otimes \Delta x, \quad (1)$$

где знаком $\otimes$ обозначена операция логической суммы векторов, а $\otimes$ — векторная операция логического умножения матрицы на вектор.



Для расчета результата транзитивного замыкания $\Delta x'$ для исходного изменения Δx^0 используется процесс рефлексий, каждая итерация которого включает в себя преобразование (1) и операцию присвоения $\Delta x := \Delta y$.

Результат **В** транзитивного замыкания оператора **A** может быть представлен в виде последовательного суммирования преобразований A^k , $k = 1, 2, \dots$ [7],

$$B = A \otimes A^2 \otimes A^3 \otimes \dots$$

В результате расчета транзитивного замыкания для исходной системы оценок взаимодействий с помощью дискретных преобразований можно получить дополнительную информацию об уровне рефлексии (числе итераций), на котором получена каждая оценка. Чем больше уровень рефлексии для полученной оценки, тем длиннее временной диапазон, соответствующий данной оценке и меньше степень ее достоверности.

2. ОПЕРАЦИИ РАСЧЕТА ОЦЕНОК ЭФФЕКТА ВОЗДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ

Пусть изменения состояния взаимодействующих факторов оцениваются величинами Δx_i . Эти оценки можно представлять как информационную меру изменения состояний НМА, учитывающую допустимый диапазон изменения количественных или качественных характеристик соответствующего фактора. Предполагая относительно малый уровень воздействий, результат действия одного фактора на другой будем представлять передачей оценки изменения состояния воздействующего фактора, имеющей ограниченное значение. Балльная шкала измерения оценок Δx_i находится в интервале $[a_{\min}, a_{\max}]$ и является общей. Модуль элемента a_{ij} матрицы взаимодействий **A** означает оценку сверху абсолютной величины первичного изменения оценки фактора i , вызываемого изменением оценки фактора j , а знак — направление изменения (аналог пропускной способности канала, направленного от фактора j к фактору i). Результирующее изменение может быть как положительным, так и отрицательным — в зависимости от знака a_{ij} . Шкала изменения коэффициентов a_{ij} также находится в диапазоне $[a_{\min}, a_{\max}]$.

При таких предположениях оценки состояния можно интерпретировать в терминах потоковой модели с объектами, принимающими значения многозначной логики, а правила операций над оценками влияния, которые также можно отнести к правилам многозначной логики, должны обладать следующими свойствами:

— результат параллельного действия связей с одной и той же оценкой должен иметь ту же оценку;

— если оба последовательных воздействия имеют оценки разных знаков, то оценка их общего результата будет отрицательной; в противном случае результат положительный;

— если связь не входит ни в один цикл, то ее оценка в результате рефлексии должна сохранять свое значение;

— эффект любой совокупности взаимодействий оценивается величинами в интервале $[a_{\min}, a_{\max}]$;

— при двузначной логике правила операций совпадают с булевой алгеброй.

Эффект двух последовательных воздействий факторов i -го на j -й с оценкой a_{ji} и j -го на k -й с оценкой a_{kj} цепочке двух взаимодействий, $a_{ji} \otimes a_{kj}$, оценивается по той из двух исходных оценок, которая минимальна по абсолютной величине (аналог конъюнкции, или логического произведения в булевой алгебре). Оценку последовательных операций можно представить в виде

$$a_{ik} \otimes a_{jk} = \min(|a_{ij}|, |a_{jk}|) \text{sign}(a_{ij}a_{jk}).$$

Если на данный фактор k параллельно действуют факторы i и j , то их совместный эффект $a_{ki} \otimes a_{kj}$ (аналог дизъюнкции, или логической суммы) может определяться различными способами, в зависимости от того, являются эти факторы взаимодополняющими или взаимно компенсирующими [6]. Параллельное применение операций, воздействующих на какой-либо фактор, может оцениваться по правилам свертки, например, по правилам, применяемым в методе комплексного оценивания [7]. В случае, когда факторы взаимодополняющие, результат определяется по принципу *доминирования*: результат равен максимальной по абсолютной величине оценке влияния факторов-аргументов, ограниченной верхней границей оценок $a_{\max}$:

$$a_{ik} \oplus a_{jk} = \min(a_{\max}, \max(|a_{ik}|, |a_{jk}|)) \text{sign}(\arg(\max(|a_{ik}|, |a_{jk}|))).$$

Такие операции обладают свойствами коммутативности и ассоциативности. В совокупности с операцией конъюнкции они образуют алгебру многозначной логики.

Если при параллельном действии факторы связаны в группу связанных (обязательных для выполнения), его результат оценивается по минимальной по абсолютной величине из оценок влияния — аналог логического произведения

$$a_{ik} \otimes a_{jk} = \min(|a_{ik}|, |a_{jk}|) \text{sign}(\arg(\max(|a_{ik}|, |a_{jk}|))).$$

С таким набором операций процесс рефлексий для каждой оценки взаимодействий монотонный и ограниченный, следовательно, сходится.

3. ОПЕРАЦИИ РАСЧЕТА ОЦЕНОК РИСКОВ

Взаимодействия факторов помимо степени влияния могут характеризоваться оценками рисков на их реализацию. Способ пересчета суммарных затрат (их рефлексивного замыкания) в определенном смысле является двойственным к способу пересчета оценок для рефлексивного замыкания степени взаимного влияния факторов (результаты действий для последовательных и параллельных операций противоположны).

Пусть рассматриваемым факторам помимо оценок состояния x_i могут быть приписаны численные значения показателей (оценки) неопределенности. Обозначим t_{ij} оценку степени риска для операции над парой факторов i, j . Для расчетов оценки рисков могут применяться следующие операции. Так, если оценку степени риска t_{ij} операции измерять значением логарифма от обратной вероятности успеха p_{ij} ,

$$t_{ij} = \log \frac{1}{p_{ij}},$$

то вероятности успеха перемножаются, а оценки риска последовательных операций складываются; для параллельных операций вероятность успеха соответствует наиболее вероятному событию, а оценка риска представляет собой минимум из соответствующих оценок.

Выполнение двух последовательных операций над парами факторов i, j и j, k требует не более, чем суммы для оценок риска каждой из них t_{ij}, t_{kj} :

$$t_{ji} \otimes t_{kj} = \min(t_{\max}, t_{ji} + t_{kj}),$$

где $t_{\max}$ — предельное значение риска операций, превышение которого означает практическую невыполнимость данной пары операций.

При параллельном выполнении двух альтернативных операций i, k и j, k выбирается наименее рискованная из них

$$t_{ki} \oplus t_{kj} = \min(t_{ki}, t_{kj}).$$

Риск выполнения группы связанных параллельных операций i, k и j, k (обязательных для реализации фактора k) оценивается по максимальному риску, что можно интерпретировать как операцию, альтернативную операции $\otimes$:

$$t_{ki} \otimes t_{kj} = \max(t_{ki}, t_{kj}).$$

Схему рисков прямых взаимодействий факторов будем представлять экспертной матрицей A . Элемент a_{ij} этой матрицы означает оценку риска прироста фактора i , вызываемого приращением

фактора j (аналог временной задержки в канале, направленном от фактора j к фактору i).

Оценки риска (неопределенности результата) взаимодействия могут представляться в балльной шкале. Значения коэффициентов a_{ij} матрицы A , назначаемые экспертным способом, находятся в интервале от 0 до $a_{\max}$. Для получения балльных оценок риска a_{ij} можно применить нормировку оценок t_{ij} :

$$a_{ij} = t_{ij} \cdot a_{\max} / \max_{i,j} t_{ij}.$$

Для определения оценок рисков для транзитивного замыкания взаимодействий факторов может применяться описанный выше процесс рефлексий (1).

Приведенные операции расчета оценок рисков в точности совпадают с операциями расчета временных задержек при взаимодействии факторов.

4. ЭКСПЕРТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ РЕФЛЕКСИВНОГО АНАЛИЗА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ НЕМАТЕРИАЛЬНЫХ АКТИВОВ

Рассмотрим пример экспертной схемы связного изменения рисков при взаимодействии аспектов НМА в рамках экономической системы страны, основанной на приведенной выше классификации (см. табл. 1) и дополненной рядом внешних факторов — качество управления, масштаб экономики, рост экономики. Приведенная схема относится в основном к макроэкономическому уровню и долгосрочному горизонту времени.

Оценка риска характеризует степень прироста риска управляемого фактора на изменение риска управляющего фактора, выраженную в балльной шкале. Зависимости записываются в соответствии с определенным форматом.

Для обозначения совместного (по типу конкатенации) воздействия факторов употребляются понятия групп влияния. Коэффициентам влияния элементов группы, кроме численного значения, приписываются символы соответствующей группы.

В табл. 2 приведен условный пример схемы оценок риска взаимного влияния аспектов НМА для макроэкономической системы. В выражениях схемы слева от знака равенства стоит название управляемого фактора. Справа от этого знака — выражение с управляющими зависимостями, снабженными экспертными оценками рисков влияния в диапазоне от -10 до 10 , соединенными знаками логических операций: $\vee$ — дизъюнкция и $\wedge$ — конъюнкция. Последняя в рассматриваемой схеме употребляется для представления взаимно дополнительных (групповых) факторов. Если при значении оценки риска стоит буквенный индекс, это



означает, что данная связь входит в соответствующую группу связанных взаимодействий. Так, оценка «3а» означает, что данный управляющий фактор действует с оценкой риска 3 и только совместно с другими управляющими факторами группы, имеющими такой же индекс «а».

Рассмотренная схема оценок риска взаимного влияния аспектов НМА относится к уровню национальной экономики. Схема содержит циклические цепочки. Например, цепочка: *Масштаб экономики* = 4 (*Рост экономики*); *Рост экономики* = 7 (*Капитализация рынка*) ∨ 3 (*Государственный заказ*); *Капитализация рынка* = 5 (*Экспорт и импорт услуг*) ∨ 6 (*Цена фирмы*); *Экспорт и импорт услуг* = 5 (*Предпринимательская активность*) ∨ 4 (*Международные ценные бумаги*) ∨ 4 (*Вклад в бюджет ООН*) ∨ 4 (*Доля голосов в МВФ*) ∨ 7 (*Масштаб экономики*) и др. Наличие таких цепочек приводит к

тому, что опосредованные оценки взаимодействий будут отличаться от первичных оценок.

Для объектов другого уровня (отрасли, предприятия) схема оценок риска, очевидно, будет другой. Частично изменятся набор факторов, а также значения оценок риска их взаимного влияния.

По исходным экспертным данным были проведены расчеты для приведенной схемы, в результате которых были получены оценки транзитивного замыкания первичных рисков с допустимыми значениями, меньшими $a_{\max}$ (табл. 3). При расчетах оценок влияния a_{ij} полагалось, что они находятся в прямой зависимости от рисков взаимодействия факторов t_{ij} и в простейшем случае совпадают. Для оценок степени влияния верхняя граница их значений $a_{\max}$ полагалась равной 10, для оценок риска $a_{\max} = 20$.

Таблица 2

Схема оценок риска взаимного влияния аспектов НМА

Бренды = 5(Технологии) ∨ 4(Лицензии на осуществление вида деятельности) ∨ 4(Права пользования природными ресурсами) ∨ 7(Реклама)
Знания = 7(Квалификация) ∨ 3(Расходы на НИОКР)
Технологии = 4(Знания) ∨ 7(Расходы на НИОКР)
Квалификация = 6(Обучение специалистов)
Предпринимательская активность = 6(Климат благоприятствования НТП) ∨ 6(Качество управления)
Климат благоприятствования НТП = 8(Капитализация рынка)
Экспорт и импорт услуг = 5(Предпринимательская активность) ∨ 4(Международные ценные бумаги) ∨ 4(Вклад в бюджет ООН) ∨ 4(Доля голосов в МВФ) ∨ 7(Масштаб экономики)
Международные ценные бумаги = 7(Лицензии на осуществление внешнеторговых и квотируемых операций)
Вклад в бюджет ООН = 5(Лицензии на осуществление внешнеторговых и квотируемых операций)
Доля голосов в МВФ = 5(Вклад в бюджет ООН)
Лицензии на осуществление вида деятельности = 4а(Предпринимательская активность) ∧ 4а(Патенты)
Лицензии на осуществление внешнеторговых и квотируемых операций = 5(Капитализация рынка)
Лицензии на использование опыта специалистов = 7(Патенты)
Права доверительного управления имуществом = 3а(Предпринимательская активность) ∧ 5а(Лицензии на использование опыта специалистов)
Права требований = 3(Предпринимательская активность)
Права пользования природными ресурсами = 3(Предпринимательская активность)
Цена фирмы = 7(Бренды) ∨ 6(Лицензии на осуществление вида деятельности) ∨ 3(Права доверительного управления имуществом) ∨ 3(Права требований) ∨ 3(Права пользования природными ресурсами)
Капитализация рынка = 5(Экспорт и импорт услуг) ∨ 6(Цена фирмы)
Государственный заказ = 4(Климат благоприятствования НТП) ∨ 3(Лицензии на использование опыта специалистов)
Расходы на НИОКР = 3(Климат благоприятствования НТП) ∨ 7(Государственный заказ)
Обучение специалистов = 5(Климат благоприятствования НТП)
Реклама = 5а(Технологии) ∧ 6а(Предпринимательская активность) ∧ 3а(Лицензии на осуществление вида деятельности) ∨ 4(Права пользования природными ресурсами) ∨ 4(Патенты)
Патенты = 7(Технологии)
Качество управления = 3(Знания) ∨ 4(Квалификация)
Масштаб экономики = 4(Рост экономики)
Рост экономики = 7(Капитализация рынка) ∨ 3(Государственный заказ)

Приведенный пример расчета демонстрирует ожидаемый результат. С наименьшим риском (максимальной надежностью) влияют следующие конечные (не обобщенные) факторы нематериальных активов — в порядке возрастания риска: *Государственный заказ, Лицензии на использование опыта специалистов, Климат благоприятствования НТП, Капитализация рынка*. Кроме того, с допустимыми рисками на *Рост экономики* оказывают влияние такие внешние факторы, как *Масштаб экономики, Качество управления*.

Предложенный подход может быть применен также на микро- и мезауровне (предприятия, отрасли). Его применение позволяет принимать рациональные управленческие решения с учетом системного эффекта от взаимодействия большого числа факторов, отследить который в ручном режиме не представляется возможным. Такие решения могут носить как оперативный, так и стратегический характер. В последнем случае для поиска решения можно поставить и решить оптимизационную задачу с естественными ограничениями нормативного характера и с целевой функцией, коррелирующей со стратегической целью управле-

ния. Для постановки задачи поиска рациональных управляющих воздействий в сфере НМА должна выделяться группа управляющих факторов и критерийный фактор (в рассмотренном примере это был *Рост экономики*), после чего должна решаться задача поиска экстремума для функции многих переменных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена классификация нематериальных активов (НМА) и внешних факторов, отображающая структуру их взаимодействия и предназначенная для анализа схемы управления НМА на макроуровне. Приведен условный пример схемы оценок риска взаимного влияния аспектов НМА для макроэкономической системы. Представлены результаты численных расчетов и их интерпретация.

Разработан новый метод моделирования на базе экспертно-рефлексивного подхода для двунаправленного анализа факторов НМА — по степени и рискам взаимодействий. Публикации на эту тему авторам неизвестны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ernst & Young*. Применение МСФО 2011: в 3-х ч. — М.: Альпина Паблишер, 2011. — 4000 с.
2. МСФО: точка зрения КПМГ. Практическое руководство по Международным стандартам финансовой отчетности. 2015/2016: в 3 ч. 12-е изд. — М.: Альпина Паблишер, 2016 г. — 2384 с.
3. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Метод рефлексивного оценивания взаимодействия факторов денежно-кредитной политики // *Фундаментальные исследования*. — 2013. — № 10. — С. 2005.
4. *Саати Т.Л.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ. Изд. 2-е. — М.: Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 360 с.
5. *Гусев В.Б.* Принятие решений в сильносвязанных структурах взаимодействия факторов и следствий // *Тр. Конгресса по интеллектуальным системам и технологиям «AIS-IT'10»*. — М., 2010. — Т. 1. — С. 124–130.
6. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Экспертный анализ системного эффекта от взаимовлияний факторов кредитно-денежной политики для поддержки принятия решений на основе рефлексивных процедур линейного оценивания и логического вывода // *Проблемы управления*. — 2014. — № 6. — С. 59–67.
7. *Гусев В.Б., Павельев В.В.* Использование непрерывных шкал при оценивании и принятии решений в сложных проблемных ситуациях / *Науч. изд.* — М.: ИПУ РАН, 2013. — 118 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Ф.Т. Алескеровым.

Гусев Владислав Борисович — канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, ✉ gusvbr@ipu.ru,

Исаева Наталия Александровна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, ✉ nat_i@ipu.ru,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.

Таблица 3

Оценки допустимых рисков управления аспектами НМА при воздействии на фактор *Рост экономики*

Аспекты НМА	Оценка влияния	Оценка риска
Предпринимательская активность	5	17
Климат благоприятствования НТП		7
Экспорт и импорт услуг		12
Международные ценные бумаги	4	16
Вклад в бюджет ООН		
Доля голосов в МВФ		
Лицензии на осуществление вида деятельности	6	19
Лицензии на использование опыта специалистов	3	6
Права доверительного управления имуществом		16
Права требований		
Права пользования природными ресурсами;	4	13
Цена фирмы	6	
Капитализация рынка	7	
Государственный заказ	5	3
Патенты	4	13
Масштаб экономики	5	19

КОМПЬЮТЕРНАЯ СЕТЬ С БЫСТРОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ СВОЕЙ СТРУКТУРЫ И ОБРАБОТКОЙ ДАННЫХ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПЕРЕДАЧИ

Г.Г. Стецюра

Рассмотрена компьютерная сеть с расширенными функциональными возможностями. Сеть полносвязная, но формируются только связи, требуемые в текущий момент. Связи быстро перестраиваются, что позволяет многократно изменять их структуру в пределах решаемой задачи. Показано, что это существенно облегчает и ускоряет выполнение массовых операций с одновременным участием многих устройств системы. Сеть позволяет, используя только сетевые средства, выполнять ряд видов распределенных вычислений над данными непосредственно в процессе их передачи по сети. Приведены примеры применения сети и технической реализации ее основных компонентов.

Ключевые слова: беспроводная оптическая сеть, динамическая реконфигурация, вычисления средствами сети, распределенная синхронизация, барьерная синхронизация.

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассмотрена разработанная в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН компьютерная сеть, ориентированная на применение в компьютерных системах, компоненты которых разнесены на небольшие расстояния, например, в системах вычислительного центра. Свойства сети отличают ее от известных сетей, они перечислены далее в § 1. Остановимся на двух отличиях, влияющих не только на функционирование сети, но также на конструирование прикладных алгоритмов и программ, на управление системой. Одно из них состоит в том, что все связи в сети могут быть изменены одновременно за время выполнения типичной команды компьютера (в наносекундном диапазоне). Так же быстро сеть может быть разделена на произвольные, независимо работающие подсети. У создателей прикладных алгоритмов и программ появляется дополнительная степень свободы — они могут в динамике управлять структурой связей компьютерной системы, подстраивая ее под текущие требования решаемой за-

дачи. В существующих универсальных компьютерных системах отсутствует возможность быстрой подстройки сети под требования задачи, и в алгоритме решения задачи необходимо дополнительно учитывать ограничения, налагаемые фиксированной сетью системы.

Другое отличие — совмещение передачи сообщений с их обработкой. В статье показано, что многие вычислительные операции и управление поведением системы могут выполняться непосредственно сетевыми средствами. При этом достигается существенное по сравнению с известной практикой ускорение таких операций.

Обычно функции средств компьютерной системы четко разделены. Основная задача сети состоит в передаче сообщений, используется режим коммутации сообщений и выполняются операции, необходимые только для передачи, обработка данных выполняется вне сети.

Совокупность предлагаемых возможностей влияет на функционирование использующей сеть компьютерной системы и позволяет сетевым средствам выполнять распределенные вычисления, уп-

рошает децентрализацию управления работой системы, ускоряет диагностику состояния сети и системы в целом.

Новые свойства сети не удастся реализовать только электронными средствами, поэтому в сети применяются известные из литературы оптоэлектронные компоненты в новом их сочетании. Сведения об этих средствах приведены далее в § 6.

Цель статьи, не углубляясь в технические детали и ограничиваясь только самой необходимой информацией, показать возможности предлагаемой сети, ускоряющие обработку данных и управление работой распределенной компьютерной системы. Подстройка структуры сети под текущие требования решаемой задачи упрощает способы создания прикладных алгоритмов, программ и системного программного обеспечения.

В статье даны ссылки на публикации и патенты автора, содержащие технические и функциональные детали, включен ряд новых результатов. Приведены ссылки на публикации по техническим средствам других авторов. Публикации с аналогичными структурными и функциональными решениями других авторов не обнаружены, хотя вопросами реконфигурации сетевых связей в цифровых системах занимаются активно. Покажем различие в решениях на широко известном примере — Software-defined network (SDN). В сети SDN, ориентированной в основном на применение в Интернете, задачи передачи данных и управления коммутацией разделены, для более гибкой коммутации все управление концентрируется в центре управления и выполняется специальным программным обеспечением (см. подробный обзор в работе [1]).

Таким образом, сеть SDN и рассмотренная в настоящей статье сеть не только относятся к разным областям применения, но и организованы различно. В сети из статьи для достижения высокого быстродействия применено распределенное управление, в сети SDN — централизованное. Для формирования быстрых связей в статье невозможно использовать работу управляющих программ, и все связи могут быть установлены одновременно одной командой, сеть не программно-, а командно-управляема. Кроме этого, сетевые средства новой сети также осуществляют многие виды обработки данных и управления.

Структура статьи: в § 1 представлена полная сводка особенностей предлагаемой сети, в § 2—5 излагается организация сети и базовые операции, без которых реализация всего сказанного выше невозможна. Специфика этих операций — время выполнения операции не зависит от числа узлов сети, одновременно участвующих в операции. В § 6

уделено внимание реализации технических средств сети. Наконец, в § 7 рассмотрены примеры использования операций сети. В Заключение изложены наиболее важные результаты.

1. ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕТИ

Представим полную сводку особенностей сети.

1. Сеть объединяет полносвязной структурой связей большое число объектов — устройств системы, выполняющих обработку и хранение данных.

2. Реализуются только те связи, которые необходимы в текущий момент времени. Средства коммутации находятся непосредственно в источнике или приемнике данных. Изменение структуры связей выполнимо в наносекундном диапазоне. Таким образом, объекты соединяются непосредственно, а структура связей способна изменяться не только от программы к программе, но и за время выполнения отдельной команды программы.

3. Непосредственное соединение объектов позволяет выполнять распределенную коммутацию каналов, закрепляя соединение между объектами на произвольный отрезок времени. Упрощение процесса соединения позволяет обмениваться короткими сообщениями.

4. Особенности п. 1—3 позволяют адаптировать структуру физических связей в системе под структуру виртуальных (логических) связей решаемой задачи, исключая появление длинных цепочек связей через звенья коммутации.

5. Выполняется быстрая синхронизация распределенных в сети источников сообщений, позволяющая приемнику получать от них сообщения одновременно или одно за другим без временных пауз между сообщениями.

6. Посылка сообщения одновременно группе приемников незначительно отличается по сложности и времени исполнения от посылки сообщения одному приемнику.

7. Сообщения могут конфликтовать только на входе в приемник; такие конфликты устраняются быстро.

8. При передаче сообщений сетевые средства могут над их содержимым выполнять вычисления без затраты дополнительного времени на проведение вычисления. Таким образом, в системе, использующей рассматриваемую сеть, нет полного разделения на коммутационные и вычислительные средства.

9. Имеются средства быстрого одновременно оповещения всех объектов об их текущем состоянии.

2. СТРУКТУРА СЕТЕВЫХ СВЯЗЕЙ И КОМПОНЕНТЫ ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ

Организация структуры оптических связей между объектами сети представлена на рис. 1. Здесь показаны компоненты сети: множество объектов и множество модулей связи, один из которых действует как системный информатор [2].

Объект выполняет внутренние действия (вычисления, хранение данных), требуемые решаемой задачей. Он также выполняет описанные далее действия по организации взаимодействия узлов сети.

Каждому объекту ставится в соответствие модуль связи, которому объект непрерывно посылает оптический сигнал частоты f_1 (на рис. 1 показано сплошной линией). Таким образом, эта пара — объект и модуль — представляет собой единое устройство, содержащее два разнесенных в пространстве компонента.

Модуль связи получает сигналы от объекта и отражает без задержки каждый поступающий сигнал его источнику. Кроме этого, также без задержки модуль выполняет следующие действия. Объект — источник сообщения посылает в модуль связи приемника сообщение оптическими сигналами частоты f_2 (штриховая линия). Если за этим модулем наблюдает соответствующий модулю объект — приемник и другие объекты, также посылающие в модуль сигнал f_1 , то модуль связи без задержки возвращает всем этим объектам их сигнал f_1 , модулированный сигналами f_2 сообщения (штрихпунктир). Таким образом, модуль *не создает* новые сигналы, для связи между объектами он использует только сигналы объектов.

Объект посылает модулям связи оптические сигналы, с помощью содержащегося в объекте демультиплексора, который посылает сигналы любому модулю, одновременно группе модулей или всем модулям сети, информатору. Переключение направления передачи сигналов выполняется быстро, в наносекундном диапазоне.

Используются сигналы — импульсный, длящийся известное всем компонентам сети время, и непрерывный, длительность которого переменная и определяется источником сигнала.

Объект также посылает модулю оптический сигнал $*f$, наличие которого запретит возврат объектам сигнала f_1 . Модуль имеет элемент памяти. Объект посылает модулю оптические сигналы $*f_1$ и $*f_2$ для перевода элемента памяти в состояния «включен/выключен» соответственно. В состоянии

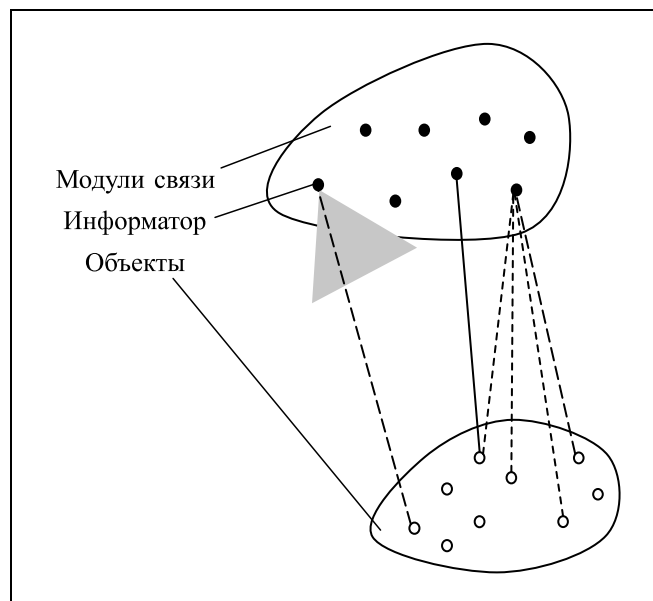


Рис. 1. Структура связей

«включен» модулю запрещен возврат полученного от объектов сигнала f_1 .

Объект — приемник для передачи сообщения источнику должен действовать подобно источнику, но ему достаточно также посылать сообщение только своему модулю, за которым наблюдает источник.

Информатор отличается от модуля тем, что он при получении сигнала одного типа (выше это сигнал f_2) создает характерный только для информатора ненаправленный сигнал f_{si} и посылает его всем объектам сети (на рис. 1 это показано треугольником). При получении сигналов $*f$, $*f_1$ и $*f_2$ информатор не передает сигналы f_{si} .

Информатор позволяет изменять структуру связей посылкой соответствующей команды всем объектам одновременно. Имеются задачи, для решения которых полезно иметь несколько информаторов.

Показанное на рис. 1 установление непосредственной связи между объектами позволяет предоставлять им соединение на произвольный отрезок времени, т. е. выполняется *распределенная коммутация каналов*.

Здесь и далее будем обозначать объект с номером i как O_i , модуль связи с номером i обозначим как MS_i , информатор обозначим как SI . Системный информатор обладает многими возможностями модуля связи, и, если не потребуются учитывать особенности информатора SI , то будем говорить о нем как о модуле связи.

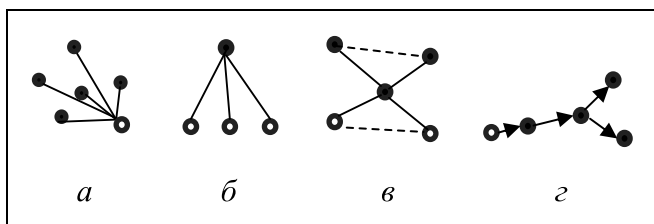


Рис. 2. Виды связей объектов сети (пояснения в тексте)

На рис. 2 приведены возможные виды связи объектов сети. Для упрощения показаны только ретрансляторы приемников (залитые кружки), которые должны быть размещены между источником и приемником.

На рис. 2, а источник (незалитый кружок) посылает сообщение произвольно выбранной группе приемников. На рис. 2, б произвольная группа источников посылает сообщения единственному приемнику. На рис. 2, в группа источников, используя ретранслятор объекта-посредника (или отдельный ретранслятор), посылает сообщение группе приемников. На рис. 2, г объект порождает цепочку или дерево связей между объектами. В цепочке логические соседи не обязательно будут физическими соседями, но связи между ними непосредственные.

Для связи (рис. 2, а) действует ограничение: к приведенной группе приемников может одновременно обращаться только один источник. Для связи (рис. 2, б) разрешено обращение к приемнику группы источников, существует способ разрешения конфликта доступа и синхронизация передач источников. Для связи (рис. 2, в) устраняется конфликт доступа источников к посреднику, после чего ему синхронно передаются сообщения источников. Приемники наблюдают за посредником и получают сообщения источников.

3. СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОСЫЛКИ ИСТОЧНИКАМИ СИГНАЛОВ МОДУЛЮ

Приведенная здесь синхронизация в ответ на приходящий от модуля MS сигнал начала синхронизации обеспечивает приход сигналов разных источников в произвольный модуль MS одновременно [2, 3]. Обозначим через T_{ij} время прохождения сигнала в цепочке «объект O_i , любой модуль MS_j , объект O_j ». Способы определения времени доставки сигнала от источника приемнику известны, не будем на них останавливаться и положим, что источники знают времена доставки сигнала каждому приемнику.

Для синхронизации произвольный объект O_i посылает свой сигнал в модуль MS_j с задержкой $*T_i = T_{\max} - T_{ij}$, где $T_{\max} \geq \max T_{ij}$. Тогда сигналы всех объектов, действующих аналогично, поступят в модуль MS_j одновременно, с единой задержкой $T_{\max}$. Если передаются сообщения, то их одновременные разряды совместятся и представят собой единое сообщение.

Если требуется, чтобы сигналы или сообщения поступали в модуль MS одно за другим без временных пауз, как одно сообщение, то каждый объект O_i должен передать свое сообщение с задержкой $T_{\max} - T_{ij} + Q$, где Q — суммарная длительность сообщений, переданных объектами ранее объекта O_i .

Для медленных сетей можно выбрать задержку $T_{\max} + Q$, оставляя в силе изложенные в данной статье результаты, но в быстрых сетях это ведет к существенному уменьшению пропускной способности.

4. УСТРАНЕНИЕ КОНФЛИКТА ДОСТУПА ИСТОЧНИКОВ К МОДУЛЮ СВЯЗИ

Если источники посылают сигналы в модуль связи MS , не согласовав их отправку, то возникает конфликт на входе в модуль, и необходимы способы его устранения.

Способ фиксированной шкалы. В соответствии с этим способом источники используют момент обнаружения конфликта как приход синхронизирующей команды от модуля MS и передают в модуль MS сообщение — логическую шкалу, представляющую собой последовательность двоичных разрядов. Каждому источнику, имеющему право посылать сообщение в данный модуль, поставлен в соответствие один из разрядов шкалы. Конфликтующий источник ставит в свой разряд единицу, остальные разряды содержат нули. Логические шкалы поступают в модуль MS одновременно, и объединенная шкала возвращается ко всем конфликтующим источникам. Источники определяют порядковый номер своей передачи и затем передают последовательно сообщения как единое сообщение без временных пауз между его частями. Конфликт устранен.

В ряде случаев следует отказаться от шкал с фиксированным числом разрядов. Например, к приемнику может обратиться заранее неизвестное число источников. В этих случаях применимы следующие способы использования шкалы с элементом случайности.

Приоритетный способ. Источникам присваиваются различающиеся между собой двоичные коды



приоритета. Источники формируют шкалу, в которой источник случайно выбирает разряд шкалы и вносит в него значение старшего разряда своего кода приоритета. Шкалы синхронно посылаются в модуль *MS* и возвращаются источникам. Далее применяется известный способ устранения конфликта [3]. Источники, пославшие в разряд значение «ноль», прекращают борьбу за право передачи сообщения, если в этом разряде обнаружен единичный сигнал, посланный другими источниками. Оставшиеся источники аналогично действуют со следующим разрядом кода приоритета и т. д., до исчерпания всех его разрядов. В результате в каждом из участвующих в борьбе разряде шкалы останется по одному источнику. Эти источники учтут состояние других разрядов шкалы и бесконфликтно передадут сообщения, как в способе фиксированной шкалы.

Случайный способ. Разрядность шкалы выбирается достаточно большой, чтобы была мала вероятность выбора одинакового разряда более чем одним источником. Источник случайно выбирает разряд шкалы и записывает в него единицу. С этой шкалой выполняются такие же действия, как в способе фиксированной шкалы. При указанном условии высока вероятность бесконфликтной передачи сообщений источников.

При объединении двух последних способов из случайной шкалы вначале создается сжатая шкала, в которой учитываются только единичные разряды, затем для этой шкалы применяется приоритетный способ.

5. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ, ГРУППОВЫЕ КОМАНДЫ

5.1. Распределенные вычисления

Виды распределенных вычислений. Рассматриваются два вида распределенных вычислений, которые выполняют сетевые средства над содержанием передаваемых по сети сообщений.

Вид 1. Такие операции как логическая сумма, логическое произведение, определение максимума или минимума выполняются сетевыми средствами над сообщениями, передаваемыми в сеть большими группами объектов одновременно. Полученный результат доступен всем объектам также одновременно.

Вид 2. Вычисления над числом, находящимся в сообщении, которое проходит через цепочку последовательно соединенных объектов. При этом выполнение вычисления не вносит задержку в передачу сообщения. В каждом вычислении участвуют находящееся в сообщении число и число, хра-

нящееся в объекте цепочки, к которому поступает сообщение. Выполняются все логические операции, нахождение $\max$ и $\min$, арифметические сложение, вычитание и умножение.

Выполнение операций вида 1. Группа источников синхронно посылает сообщения в выбранный ими модуль *MS* так, что они накладываются друг на друга поразрядно, формируя общее сообщение. Разряды представлены активными сигналами, например, каждый разряд в сообщении представлен двумя битами — 10 для единицы и 01 для нуля. Все приемники, наблюдающие за этим модулем, получают отраженное им сообщение. Если выполняется логическое сложение, то полученные при наложении разрядов пары 10 и 11 считаются единицей. Для логического умножения единицей будет наложение разрядов пары 10 и 10.

При определении максимума или минимума группа источников посылает сообщения в модуль *MS*, как в предыдущем случае, но в сообщениях не требуется выделять для каждого разряда сообщения два бита. В числах, передаваемых в модуль *MS* источниками, каждый разряд выделяется для отдельной подгруппы из группы источников. Источники всех подгрупп одновременно находят числа с максимальным (минимальным) значением в подгруппе.

Для этого источники подгруппы посылают сообщения, содержащие числа, в модуль *MS* так, чтобы одноименные разряды чисел совместились. Вначале источники посылают в модуль *MS* старший разряд сравниваемых чисел. Модуль *MS* возвращает сигналы источникам, и если источник, пославший в модуль ноль, получает от него единицу, то он прекращает использовать далее этот разряд. Такая операция продолжается для всех остальных разрядов сравниваемых чисел. В итоге одновременно для всех подгрупп будут выявлены максимальные из посланных их источниками чисел. Приведенные действия не отличаются от действий со шкалой в приоритетном способе (см. § 4). При инверсии представлений сигналов «единица» и ноль аналогичным способом находится минимум.

Таким образом, результат операций вида 1 создается модулем *MS* без участия вычислительных средств объектов, а время выполнения операции не зависит от числа объектов, участвующих в операции. Результат операции поступает параллельно ко всем устройствам.

Расширение возможностей операций вида 1. Пусть объекты синхронно передают в один из модулей связи сообщения не одновременно, а одно за другим, но без временных пауз между сообщениями. Модуль возвращает сообщения объектам, которые выполняют их обработку доступным им способом.

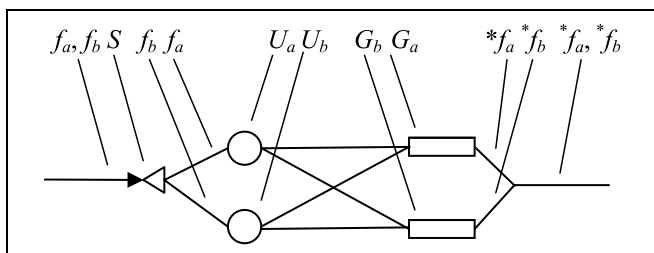


Рис. 3. Вычисление в цепочке объектов

Хотя здесь время доставки сообщений и зависит от числа объектов, но при коротких сообщениях в рассматриваемой распределенной системе время выполнения операции будет зависеть в основном не от числа сообщений, а от расстояния между объектами. Положительный эффект — снимается ограничение на состав операций вида 1.

Выполнение операции вида 2. Пусть группа объектов соединена в цепочку: первый объект направляет сообщение в MS второго объекта, второй объект, получив это сообщение, направляет его в модуль MS третьего объекта и т. д. Двоичные разряды чисел в передаваемом сообщении представлены сигналами двух видов: f_a для значения 1 и f_b для значения 0. Все дальнейшие действия выполняются без задержки поступивших в объект сигналов, как показано на рис. 3. Здесь в объект поступает сигнал f_a или f_b . Разделитель S направляет поступивший сигнал, в зависимости от его значения, по одному из двух указанных на рис. 3 путей. На выходе из этих путей расположены управляемые объектом переключатели U_a и U_b . Для выполнения вычисления объект *до прихода в сообщении очередного бита* обрабатываемого двоичного числа устанавливает переключатели в требуемое объекту состояние. Объект для этого использует только значение, хранящегося в нем числа, и информацию о виде операции. После этого поступает входной сигнал, который, пройдя переключатель, поступит на один из двух источников сигналов G_a , или G_b , создающих сигналы $*f_a$ или $*f_b$ соответственно. Сигнал, пришедший в источник, включает его, и созданный источником сигнал направляется следующему объекту в цепочке.

Объекты с помощью переключателей U_a и U_b выполняют четыре действия.

Действие M_1 : при приходе сигнала f_a (f_b) он переводится на выходе в сигнал $*f_b$ ($*f_a$).

Действие M_2 : сигналы f_a и f_b переводятся в сигнал $*f_a$.

Действие M_3 : сигналы f_a и f_b переводятся в сигналы $*f_b$.

Действие M_4 : сигналы f_a и f_b переводятся в сигналы $*f_a$ и $*f_b$ соответственно.

Эти действия не анализируют значение приходящего сигнала, и поэтому результат действия появляется на выходе объекта без временной задержки на анализ.

Действий M_1 — M_4 достаточно для выполнения указанных операций над числом в сообщении и числом в объекте [2, 3]. Примеры выполнения распределенных вычислений без задержки приведены в работе [4].

Выдача сигналов $*f_a$ и $*f_b$ вместо сигналов f_a и соответственно f_b объясняется тем, что модуль MS , получая от источника сообщение сигналами одного типа (f_2), передаст его приемнику сигналами другого типа (f_1). Поэтому на рис. 3 на входе и выходе должны быть разные типы сигналов: $*f_a$ вместо f_a и $*f_b$ вместо f_b . Их создают источники сигналов G_a и G_b соответственно.

Подчеркнем, что использование пар сигналов f_a и f_b для вычислений в цепочке потребовало вместо указанных выше одиночных сигналов f_1 и f_2 ввести соответствующие им пары сигналов.

Приведем два простых примера, показывающих отсутствие задержки в операциях вида 2.

Пусть объектам цепочки требуется выполнить поразрядное логическое умножение. Каждый объект до начала операции анализирует значения разрядов хранящегося в нем числа и подготавливает следующие действия. Если разряд числа имеет значение 0, то следует выполнять действие M_3 , иначе M_4 . Затем передается сообщение, и время его передачи с выполнением в цепочке логических умножений не отличается от времени передачи без вычислений.

Теперь выполним сложение текущих разрядов двоичного числа, хранящегося в объекте и числа из приходящего в объект сообщения. Объект, с учетом значений переноса из предыдущего разряда и текущего разряда числа в объекте, выбирает следующие действия. Если объекту требуется выполнить сложение с нулем, то он выбирает действие M_4 , иначе выбирается действие M_1 . Так как каждый объект цепочки выбирает действия до прихода к нему разряда числа независимо от действий других объектов, то времена переключений в цепочке объектов не суммируются.

5.2. Групповые команды

В групповых командах используются вычисления по п. 5.1. Групповая команда (ГК) — это сообщение, которое перемещается через цепочку объ-



ектов и содержит данные и инструкции объектам по обработке находящихся в ГК данных, изменению содержащихся в ГК инструкций, выполнению локальных действий в объекте [3]. Для изменения в ГК ее содержимого объект, проанализировав часть проходящей через него ГК, заменяет оставшуюся часть ГК своей информацией *без задержки* ГК на это преобразование. В результате ГК, перемещаясь через цепочку объектов, собирает по пути информацию об объектах и изменяется сама. Ее влияние на объект зависит от действий предшественников объекта в цепочке. Сообщение может быть также групповой программой, состоящей из последовательности групповых команд, сформированной несколькими объектами.

При выполнении вычислительных операций вида 1 возможны групповые команды, которые как единая команда приходят ко многим объектам одновременно.

6. О РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СЕТИ

Для реализации предложенных в настоящей статье решений требуется разработка компонентов, выполняющих функции демультиплексора, ретранслятора и информатора. Анализ литературы показал наличие устройств, близких к требуемым. Рассмотрим эти устройства.

Демультиплексор — находится в каждом объекте и соединяет объект с любым модулем *MS* системы или одновременно с произвольной группой модулей. Требуемая организация такого демультиплексора на основе решетки управляемых лазеров описана в работах [5, 6]. В работах [7, 8] даны примеры реализации решеток лазеров.

Модуль связи. Основные составляющие модуля — ретрорефлектор, модуляторы света, фотоприемники [2, 9, 10]. В качестве примера работы, где применены все эти компоненты, приведем упрощенно результаты из статьи [11] (рис. 4).

Сигнал *1* фокусируется на зеркале 4 и возвращается к источнику. Сигналы *1* от других таких же источников попадут на другие участки зеркала и также возвратятся к источникам. На прямом и обратном пути каждый сигнал *1* проходит через соответствующий ему элемент 3, используемый как фотодетектор при приеме сигнала и как модулятор света при возврате сигнала источнику. На прямом пути сигнал *1* несет сообщение источника, принимаемое фотодетектором 3. После передачи сообщения источник, используя *1*, передает непрерывный сигнал *1*. Этот сигнал приемник модулирует электрическими сигналами, действующими на элемент 3 — модулятор, и такое сообщение возвращается источнику. Каждому источнику выде-

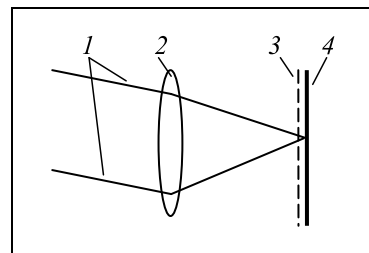


Рис. 4. Модуль связи с ретрорефлектором: 1 — световой сигнал от удаленного лазерного источника; 2 — линза; 3 — плоскость с многими модуляторами/фотоприемниками; 4 — фокальная плоскость линзы, в которой расположено зеркало; элементы 2 и 4 составляют ретрорефлектор типа «кошачий глаз»

лен отдельный элемент 3, и устройство, показанное на рис. 4, имеет независимо работающие каналы для связи с каждым источником сигналов *1*. В настоящее время появились близкие по подходу работы других авторов.

В предлагаемом модуле связи требуются аналогичные компоненты с некоторыми изменениями:

- упрощение: модулятор/фотоприемник 3 должен быть общим для всех объектов;

- усложнение: модулятор должен быть избирательным по частоте. Однако можно ограничиться средствами из работы [11]: устройство (см. рис. 4) позволяет разделить поток после линзы на два потока и направить их на два комплекта компонентов 3 и 4.

Информатор. В информаторе *SI* новым по сравнению с компонентами рассмотренных устройств является источник модулированных ненаправленных оптических сигналов. Известны появившиеся в последнее время разработки таких устройств, передающих сигналы с частотами модуляции выше 10 ГГц [12].

Отметим, что появились публикации, посвященные созданию систем на кристалле с применением оптических беспроводных соединений устройств системы [13]. Некоторые из рассмотренных решений применимы и в таких системах.

В настоящей статье изложение построено в предположении, что сигналы передаются в пределах помещения вычислительного центра. Однако, подобно работе [13], для обмена сигналами можно создать пылезащитную конструкцию, в которую помещены оптические компоненты демультиплексоров и модулей связи.

7. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ СЕТИ

Барьерная синхронизация. Эта обычно длительная операция быстро решается с использованием изложенных выше результатов. Рассмотрим один

из ее вариантов. Пусть все источники группы P должны передать сообщения группе приемников после того, как все приемники будут готовы к приему сообщений. Для синхронизации в группе P источников выделяется один ее представитель O_p . Его модуль MS_p становится известным всем участвующим в барьерной синхронизации источникам и приемникам, которые начинают следить за модулем MS_p , посылая ему сигналы f_1 (в качестве модуля MS_p может быть взят свободный модуль, не связанный с объектом). После этого источник O_p посылает всем объектам, наблюдающим за модулем MS_p , сообщение о начале барьерной синхронизации, в ответ на которое все приемники синхронно посылают в модуль MS_p сигнал $*f_1$, запрещающий ему возврат сигналов f_1 . Готовые к приему сообщения объекты через фиксированный интервал времени T_b пошлют в модуль MS_p сигнал $*f_2$, и их запрет будет снят. Остальные приемники будут посылать сигнал $*f_2$ по мере их готовности к приему сообщений. После готовности всех источников модуль MS_p начнет возвращать сигнал f_1 , что будет признаком завершения подготовки к передаче сообщений. Получив сигнал f_1 , объекты передадут сообщения синхронно с задержками $*T_i$ в модуль MS_p , и все приемники получают его как единое сообщение.

Использование сигналов $*f_1$ и $*f_2$ вместо сигнала $*f$, (см. п. 2.1) избавляет приемник от необходимости непрерывной передачи сигнала в модуль MS_p .

Интервал T_b вспомогательный, он гарантирует источнику, что все приемники участвуют в барьерной синхронизации (квотирование).

Аналогично определяется готовность источников к передаче сообщения.

Сетевые коллективные взаимодействия в MPI. Эту важную тему затронем кратко. Коллективные взаимодействия, в которых одновременно участвуют группы процессов, широко применяются в интерфейсе передачи сообщений MPI, но они требуют значительных затрат времени. Здесь покажем, что предлагаемые сетевые решения существенно ускоряют эти взаимодействия.

В MPI коллективные взаимодействия выполняют три вида функций. Первый вид — функции, выполняющие коллективный обмен сообщениями и синхронизирующие взаимодействие процессов. Примеры таких функций: MPI_BCAST — передача сообщения от одного всем; MPI_ALLTOALL — передача от всех всем; MPI_BARRIER — барьерная синхронизация. Второй вид — функции редукции, выполняющие распределенные вычисления с

участием групп процессов. Это функции MPI: max, min, sum, maxloc и др. Третий вид — функции, отображающие виртуальную (логическую) структуру связей в задаче на реальную структуру системы, например, MPI_GRAPH_CREATE — создать граф связей.

Непосредственное применение изложенных выше операций синхронизации, барьерной синхронизации и двух видов вычислений (см. § 5) существенно ускоряют все три вида операций. В значительной степени действия выполняются с помощью аппаратных средств сетевых контроллеров объектов. По поводу операций третьего типа заметим, что при использовании рассматриваемой сети виртуальные соседи всегда соединяются короткими физическими связями. Установленная связь сохраняется в течение произвольного отрезка времени.

Эволюционные вычисления. Во многих эволюционных алгоритмах объекты группы, действуя параллельно, находят частные варианты решения, которые требуется сравнить между собой для выявления решения, имеющего максимальное значение. Часто после этого объектам требуется выделить частные решения, близкие к наилучшему решению, и сравнить структуры этих решений. Операции сравнения распределенных решений медленные. Рассмотренные в § 5 способы параллельных распределенных вычислений позволяют ускорить операции сравнения. Так как на получение частных решений разным объектам может потребоваться разное время, то начало операций сравнения требуется синхронизовать. Для синхронизации применяется предложенная барьерная синхронизация.

Борьба с повреждениями сети и системы. Рассмотрены два вопроса: устранение повреждений сети, нарушающих ее целостность и информирование о количестве и расположении неисправных объектов системы. Единственный вид компонентов сети, повреждения которых влияют на ее целостность, это MS . Объект — приемник, обнаружив отказ используемого им модуля, занимает запасной модуль, проводя борьбу за модуль с другими объектами. Если отказов больше, чем имеется запасных модулей MS , то объект будет подключен к модулю, уже занятому другими объектами, и будет использовать модуль совместно с ними. Таким образом, при наличии хотя бы одного исправного MS объекты сохраняют возможность взаимодействия.

При выявлении неисправных объектов предполагается, что они проводят диагностические тесты и требуется выяснить, есть ли отрицательные результаты тестов и если они есть, то указать количество и места отказов. Для обнаружения отказов объектам достаточно на проверяющий запрос синхронно ответить совмещенными во времени сооб-



щениями, состоящими из двух битов: 10, если тест прошел, и 01, если не прошел.

Количество и места отказов находятся при помощи шкал (см. § 4) или вычислением в цепочке нумерованных объектов. Каждый работоспособный объект цепочки принимает номер из цепочки и посылает свой номер далее в цепочку. Если принятый номер отличается более чем на единицу от номера объекта, то объект его запоминает. Затем посылается групповая команда, собирающая места всех неисправностей: в нее объекты помещают свой номер и дефектный номер, полученный из цепочки.

Сетевой закон Амдала в сети, совмещающей передачу и обработку данных. Сетевой закон Амдала записывается в форме

$$T = T_s + T_p/n + T_{nw}, \quad (1)$$

где T , T_s и T_p — времена выполнения всей программы, ее последовательной и параллельной частей соответственно, n — число объектов (с ростом n вклад второго слагаемого уменьшается), T_{nw} — затраты времени на обмены в сети. Обычно это выражение преобразуется далее, но ограничимся формой (1).

Для сети, совмещающей передачу и обработку данных, время выполнения программы в сетевом законе Амдала выглядит иначе:

$$*T = k_1 T_s + k_2 T_p/n + T_{pnw} + k_3 T_{nw}, \quad (2)$$

где k_1 , k_2 и k_3 — числовые коэффициенты, T_{pnw} — время выполнения в сети части вычислений объектов. Из-за появления величин T_{pnw} значения слагаемых в выражении (2) могут измениться, что учитывается коэффициентами.

Времена T_s и T_p могут уменьшиться из-за передачи части обработки данных в сеть. Значение T_{nw} может уменьшиться из-за появления слагаемого T_{pnw} , и значение $k_3 T_{nw}$ станет меньше T_{nw} . Покажем возможность $*T < T$ на примерах операций статьи.

Для выполнения группой объектов поразрядных логического умножения и сложения требуется только одна одновременная пересылка всех операндов (см. п. 5.1). Эта пересылка совмещена с процессом вычисления, операция выполняется только сетевыми средствами, исключены все последовательные операции. В результате коэффициенты k_1 , k_2 и k_3 равны нулю, и $*T = T_{pnw}$. Время выполнения операции не зависит от числа выполняющих ее объектов. Ускорение вычисления и независимость от числа участников операции достигается также при нахождении $\max$, $\min$, вычислениях на цепочке объектов, барьерной синхрони-

зации, при реализации многих функций MPI, эволюционных вычислениях. При этом изменяется организация процесса вычисления — операции, обычно длительные, применять которые стремились избегать, становятся быстрыми.

Таким образом, при соответствующем выборе алгоритма решения задачи сеть, совмещающая передачу и обработку данных, дает существенный выигрыш.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из полученных результатов выделим наиболее отличающие предложенную сеть от известных сетей.

- Структура связей предлагаемой беспроводной оптической сети может быть изменена за время выполнения отдельной команды программы.
- Сообщения, посылаемые произвольно расположенными в сети источниками, доставляются приемнику (или группе приемников) как единое сообщение без временных пауз между отдельными сообщениями.
- Сетевые средства над содержимым передаваемых сообщений могут выполнять вычисления без затрат дополнительного времени.
- Средства сети позволяют существенно ускорить реализацию ряда сложных функций (показано на примере MPI), иначе строить прикладные алгоритмы.
- Возможности сети изменяют оценку сложности выполнения задач на компьютерной системе и позволяют выбирать пути ее решения, которые обычно считаются неэффективными или невозможными.
- В последнее время часто считается, что в сложных компьютерных системах, например, в суперкомпьютерах, придется отказаться от универсальной структуры связей и создавать проблемно ориентированные системы с соответствующим набором устройств и объединяющей их специализированной сетевой структурой. Предложенная сеть дает дополнительную возможность получения проблемной ориентации — быструю адаптацию универсальной структуры связей под текущие требования каждой отдельной задачи и алгоритма ее решения.

При этом алгоритм и технические средства могут взаимно влиять на их организацию, но нельзя изменять внутренние связи между компонентами задачи, которые, однако, влияют на все составляющие решения задачи. Поэтому желательно связи в различных задачах классифицировать с учетом их дальнейшего решения на компьютерах. Возможно, классификации может способствовать то,

что значительную часть решаемых на компьютерах задач составляют задачи моделирования явлений природы и поведения сложных артефактов.

Сетевые свойства таких объектов широко изучаются, в последние годы учитывается динамика их поведения. Полезно установить связь этих исследований с исследованиями компьютерных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zilberman N., Watts P.M., Romsos C., Moore A.W. Reconfigurable Network Systems and Software-Defined Networking // Proc. of the IEEE. — 2015. — Vol. 103, N 7. — P. 1102—1124.
2. Стецюра Г.Г. Быстрые способы выполнения параллельных алгоритмов в цифровых системах с динамически формируемой сетевой структурой связей // Управление большими системами. — 2015. — Вып. 57. — С. 53—75. — URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS5703.pdf> (дата обращения: 15.05.16).
3. Стецюра Г.Г. Базовые механизмы взаимодействия активных объектов цифровых систем и возможные способы их технической реализации // Проблемы управления. — 2013. — № 5. — С. 39—53. — URL: http://pu.mtas.ru/archive/Stetsyura_13.pdf (дата обращения: 15.05.16). — doi: 10.1134/S000511791504013X (in English).
4. Стецюра Г.Г. Совмещение вычислений и передачи данных в системах с коммутаторами // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 5. — С. 170—179. — URL: <http://www.mathnet.ru/links/88b780543febe14c50f605248e58d92f/at664.pdf> (дата обращения: 15.05.2016. — Рус./Engl.).
5. Стецюра Г.Г. Средства для расширения функций коммутируемых непосредственных оптических связей в цифровых системах // Управление большими системами. — 2015. — Вып. 56. — С. 211—223. — URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS5610.pdf> (дата обращения: 15.05.16).
6. Пат. 2580667 РФ. Способ лазерной беспроводной ретро-рефлекторной распределенной оптической коммутации и система для его реализации / Г.Г. Стецюра. Оpubл.: 10.04.2016 // Бюл. — 2016. — № 10.
7. Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Шуленков А.С. и др. Матрицы вертикально излучающих лазеров спектрального диапазона 960 нм // Физика и техника полупроводников. — 2011. — Т. 45, вып. 6. — С. 836—839. — URL: <http://journals.ioffe.ru/ftp/2011/06/p836-839.pdf> (дата обращения: 15.05.16).
8. Bardinal V., Camps T., Reig B., et al. Collective Micro-Optics Technologies for VCSEL Photonic Integration // Advances in Optical Technologies. — 2011. — doi:10.1155/2011/609643.
9. Стецюра Г.Г. Организация коммутируемых непосредственных соединений активных объектов сложных цифровых систем // Управление большими системами. — 2014. — Вып. 49. — С. 148—165. — URL: <http://ubs.mtas.ru/upload/library/UBS4906.pdf> (дата обращения: 15.05.16). — doi: 10.1134/S0005117916030139 (in English).
10. Пат. 2538314 РФ. Способ повышения отказоустойчивости распределенной оптической коммутации и реализующий его бесконфликтный беспроводной ретрофлекторный коммутатор / Г.Г. Стецюра. Оpubл.: 10.01.2015 / Бюл. — 2015. — № 1.
11. Rabinovich W.S., Goetz P.G., Mahon R., et al. 45-Mbit/s cat's-eye modulating retroreflectors // Optical Engineering. — 2007. — Vol. 46, N 10. — P. 1—8.
12. Gomez A., Kai Shi, Quintana C., Sato M., et al. Beyond 100-Gb/s Indoor Wide Field-of-View Optical Wireless Communications // IEEE Photonics Technology Letters. — 2015. — Vol. 27, iss. 4. — P. 367—370.
13. Savidis I., Cifcioglu B., Xue J., et al. Heterogeneous 3-D circuits: Integrating free-space optics with CMOS // Microelectronics Journal. — April 2016. — Vol. 50. — P. 66—75.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.М. Вишневым.

Стецюра Геннадий Георгиевич — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ gstetsura@mail.ru.

10-Я ВСЕРОССИЙСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ (МКПУ-2017)

25—30 сентября 2017 г.

с. Дивногоorskое, Геленджикский р-н, Краснодарский край, Россия

Мультиконференция включает в себя три локальные научно-технические конференции:

- **Модели, методы и технологии интеллектуального управления (ИУ—2017)**, председатель — академик С.Н. Васильев;
- **Робототехника и мехатроника (РиМ—2017)**, председатель — академик Ф.Л. Черноушко;
- **Управление в распределенных и сетевых системах (УРСС—2017)**, председатель — академик И.А. Каляев.

Заявки на участие и тезисы докладов должны поступить в Оргкомитет Мультиконференции (НИИ МВС ЮФУ) по e-mail: mail@niimvs.ru не позднее 15.05.2017 г.

Подробности см. по адресу: <http://www.ipu.ru/node/40279>.



ПОСТРОЕНИЕ САМОПРОВЕРЯЕМЫХ СТРУКТУР СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ НА ОСНОВЕ РАВНОВЕСНОГО КОДА «2 ИЗ 4»

В.В. Сапожников, Вл.В. Сапожников, Д.В. Ефанов

Рассмотрен метод логического дополнения для организации систем функционального контроля на основе равновесного кода «2 из 4» (2/4-кода). Формализованы правила вычисления функций логического дополнения для преобразования любого вектора значений рабочих функций в системе функционального контроля до вектора 2/4-кода. Сформулированы необходимые и достаточные условия, предъявляемые к контролируемому логическому устройству для обеспечения свойства полной самопроверяемости структуры системы функционального контроля.

Ключевые слова: система функционального контроля, логическое дополнение, код «2 из 4», полностью самопроверяемая структура, тестирование.

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании надежных систем автоматики и вычислительной техники часто применяются методы функционального, или рабочего, контроля [1–3]. Один из распространенных подходов заключается в применении систем функционального контроля, позволяющих косвенно по результатам вычислений значений реализуемых объектом диагностирования функций определять его техническое состояние. При этом объект диагностирования $F(x)$ снабжается специализированной схемой контроля, позволяющей в процессе функционирования определять его техническое состояние без отключения выходов от управляемых объектов [4].

На рис. 1 изображены структурные схемы систем функционального контроля логических устройств автоматики и вычислительной техники. Первая из них реализована согласно классической структуре с использованием разделимых (m, k) -кодов (m и k — длины информационных и контрольных векторов соответственно) [5–8]. Вектор значений рабочих функций отождествлен с информационным вектором (m, k) -кода. Схема контроля содержит в своей структуре блок контрольной логики $G(x)$, формирующий векторы значений контрольных функций, соответствующие контрольным векторам заранее выбранного (m, k) -кода, а также схему тестера TSC . Тестер предназначен для установления факта соответствия информацион-

ных и контрольных векторов друг другу. Если соответствие нарушено, то тестер формирует контрольный непарафазный сигнал $\langle 00 \rangle$ или $\langle 11 \rangle$ [9].

Характеристики системы функционального контроля определяются топологией логического устройства $F(x)$, выбранным на этапе проектирования (m, k) -кодом, а также способом реализации блоков схемы контроля. Для установленного (m, k) -кода система функционального контроля по структурной схеме, изображенной на рис. 1, а, может быть построена единственно возможным способом, «жестко» определяющим характеристики обнаруживаемых на выходах блока $F(x)$ ошибок. Этому недостатка лишена система функционального контроля, реализующая принцип логического дополнения функций (рис. 1, б) [10–14].

В отличие от классической схемы системы функционального контроля, приведенной на рис. 1, а, данная схема позволяет с использованием выбранного кода строить некоторое множество систем функционального контроля, различных по своим характеристикам, в том числе и по обнаружению неисправностей. При этом возможна оптимизация системы по критерию минимума структурной избыточности. Возможность получения различных структур систем функционального контроля по методу логического дополнения реализуется при помощи блока логического дополнения, содержащего каскад сумматоров по модулю два (XOR). Каждый сумматор позволяет преобразовать значение разряда функции f_i в требуемое значение конт-

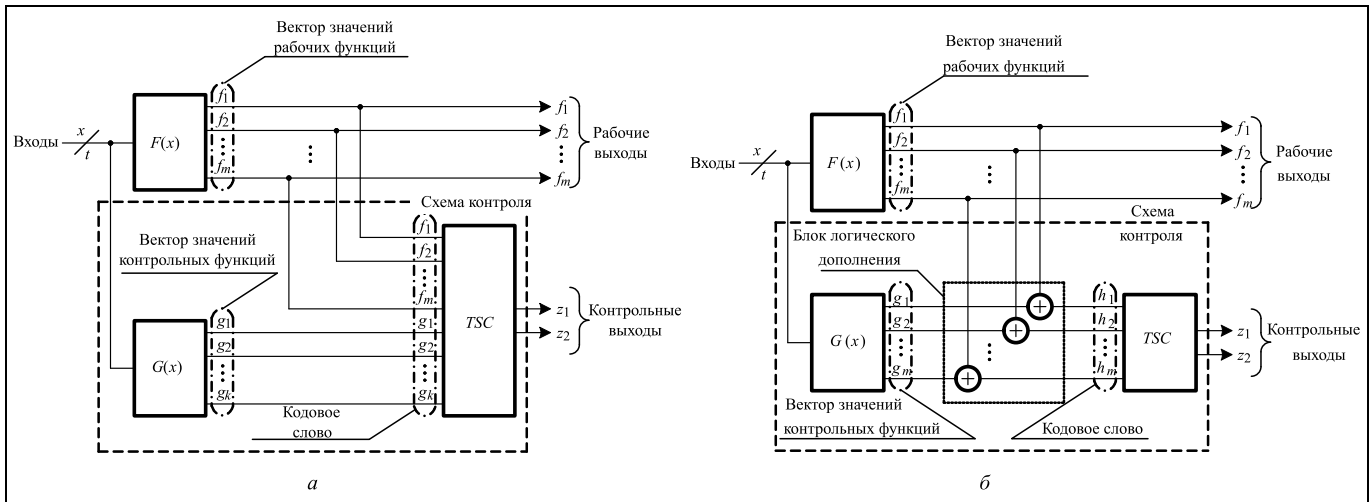


Рис. 1. Структурная схема системы функционального контроля на основе: а — разделимого кода; б — логического дополнения

рольной функции h_i : $h_i = f_i \oplus g_i$, $i = \overline{1, m}$. Тестер в описываемой системе выполняет ту же роль устройства фиксации неисправностей, что и в системе, приведенной на рис. 1, а.

При организации системы функционального контроля важно обеспечить свойство полной самопроверяемости ее структуры. Для решения этой задачи необходимо выполнить два условия. Первое заключается в том, что устройство $F(x)$ должно быть проверяемым, другими словами, любая неисправность из заданного класса (это, как правило, одиночные константные неисправности выходов внутренних логических элементов [4]) обнаруживалась в момент ее первого проявления на выходах устройства. Второе условие связано с обеспечением свойства полной самопроверяемости структуры схемы контроля, что в свою очередь требует, чтобы блок контрольной логики $G(x)$ был проверяемым, как и блок $F(x)$, а тестер TSC , как «последний сторож» в системе, — полностью самопроверяемым. Вообще, свойство полной самопроверяемости некоторого устройства подразумевает, что любая неисправность из заданного класса на выходах элементов его внутренней структуры должна проявиться на выходах устройства в виде некоторой защитной комбинации хотя бы на одном входном воздействии. Для тестера TSC это требует появления на его входах множества тестовых комбинаций, необходимых для его полной проверки [9].

Для обеспечения свойства полной самопроверяемости структуры, приведенной на рис. 1, б, помимо обозначенных выше условий, требуется также обеспечить подачу полного множества тестовых комбинаций для каждого элемента XOR в блоке логического дополнения. В общем случае, вне зависимости от привязки к технологии реализации

данного элемента, например, при его канонической реализации, это набор комбинаций $\{00; 01; 10; 11\}$ [15]. При рассмотрении функциональных же особенностей элементов XOR комбинация $\langle 11 \rangle$ может быть исключена из множества тестовых наборов.

В данной работе предлагается способ организации системы функционального контроля на основе метода логического дополнения с полностью самопроверяемой структурой на основе равновесного 2/4-кода.

1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАВНОВЕСНЫХ КОДОВ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ СИСТЕМ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Равновесные коды при организации систем функционального контроля находят широкое применение по двум причинам. Прежде всего, для обеспечения полной самопроверяемости тестеров равновесных кодов с малой длиной кодового слова требуется небольшое число комбинаций. Например, для тестера равновесного 1/4-кода (рис. 2, а) множество тестовых комбинаций содержит четыре элемента — $\{0001; 0010; 0100; 1000\}$ [9]. Аналогичную мощность множества тестовых комбинаций имеют и наиболее простые тестеры 2/4-кодов (рис. 2, б) — $\{0011; 1100; 1001; 0110\}$ [16]. Кроме того, равновесные коды обладают свойством идентификации любых монотонных искажений в кодовых словах. При этом, однако, равновесные коды не обнаруживают некоторую долю симметричных ошибок (ошибок, содержащих группы искажений $\{0 \rightarrow 1; 1 \rightarrow 0\}$ [17, 18]). Их число определяется выражением

$$N_{r,m} = \sum_{d=2}^{m,(m-1)} C_m^r C_r^{d/2} C_{m-r}^{d/2}, \quad (1)$$

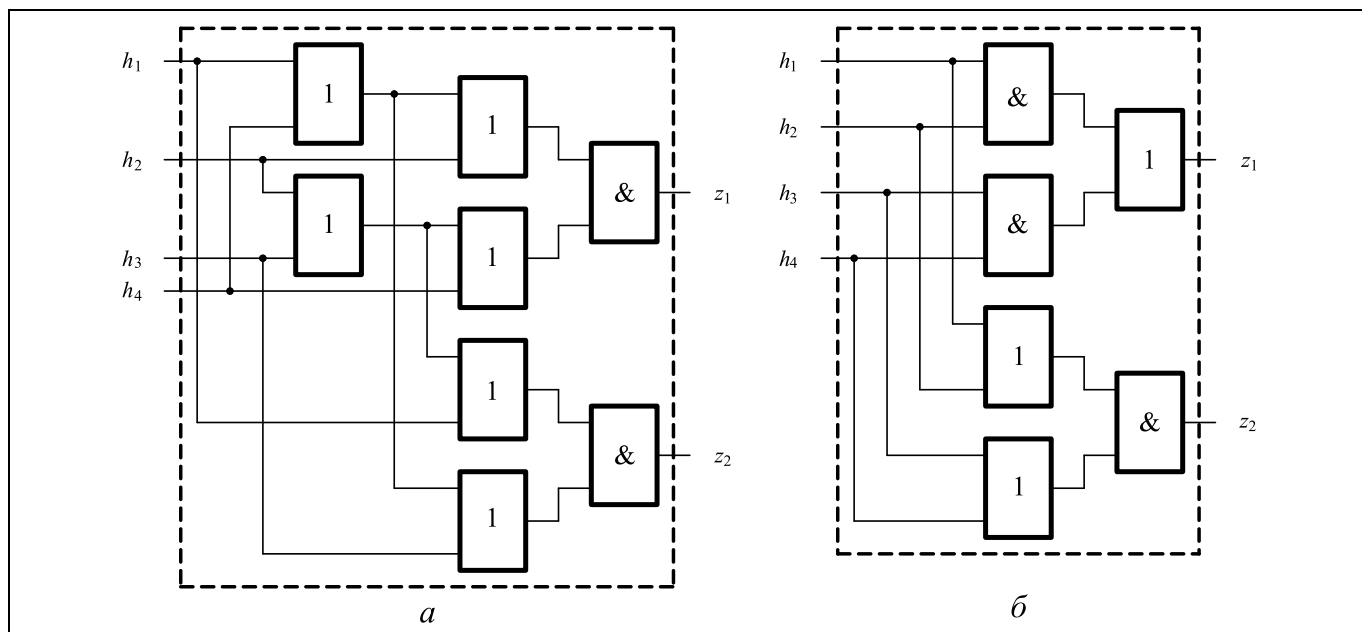


Рис. 2. Схемы тестеров: а — 1/4-кода; б — 2/4-кода

где r — вес кодовых слов кода « r из m », d — кратность необнаруживаемых ошибок (d — четное).

Сомножитель C_m^r в формуле (1) определяет общее число кодовых слов кода « r из m », сомножитель $C_r^{d/2}$ — число искажаемых единичных разрядов, а сомножитель $C_{m-r}^{d/2}$ — число искажаемых нулевых разрядов в кодовых словах равновесного кода.

Например, применяя формулу (1) для 2/4-кода, получаем

$$N_{2,4} = \sum_{d=2}^4 C_4^2 C_2^{d/2} C_2^{d/2} = C_4^2 C_2^1 C_2^1 + C_4^2 C_2^2 C_2^2 = 6 \cdot 2 \cdot 2 + 6 \cdot 1 \cdot 1 = 24 + 6 = 30$$

необнаруживаемых ошибок в его кодовых словах (что составляет 12,5 % от общего числа ошибок в кодовых векторах длины $m = 4$). Среди 30-ти необнаруживаемых ошибок у 2/4-кода имеется 24 двукратных и 6 четырехкратных ошибок.

Несмотря на то, что в классе необнаруживаемых ошибок у равновесных кодов присутствует некоторая доля симметричных ошибок, они могут эффективно применяться при синтезе систем функционального контроля со 100 %-м обнаружением любых одиночных неисправностей. Существуют алгоритмы модификации топологии логических устройств автоматики и вычислительной техники в структуры, допускающие возникновение на их выходах только монотонных искажений [19, 20].

В работах [10, 12, 21, 22] описаны особенности применения 1/4-кодов в задачах организации систем функционального контроля. В работе [16] пред-

ложен способ организации системы функционального контроля на основе 2/4-кода, обладающий рядом преимуществ перед способом организации системы диагностирования на основе 1/4-кода. Для обеспечения свойства полной самопроверяемости структуры, однако, указанные способы требуют детального анализа формируемых векторов значений рабочих функций блока $F(x)$, а определение значений функций дополнения связано с подбором тестовых комбинаций для тестера TSC и элементов XOR . В § 2 покажем, что можно формализовать процесс определения значений функций логического дополнения для 2/4-кода и избежать процедуры подбора значений функций дополнения.

2. ФУНКЦИИ ЛОГИЧЕСКОГО ДОПОЛНЕНИЯ

При организации системы функционального контроля необходимо значения разрядов вектора рабочих функций $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$ преобразовать в значения разрядов векторов 2/4-кода $\langle h_1 h_2 h_3 h_4 \rangle$ (рис. 3). Для преобразования любого вектора $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$ в вектор $\langle h_1 h_2 h_3 h_4 \rangle$ достаточно использовать только две функции дополнения, например, функции g_3 и g_4 . Таким образом, в структуре системы функционального контроля минимизируется сложность блоков контрольной логики и логического дополнения (см. рис. 2). Сами функции логического дополнения должны быть такими, чтобы на входах каждого элемента сложения по модулю два XOR_3 и XOR_4 хотя бы по разу фор-

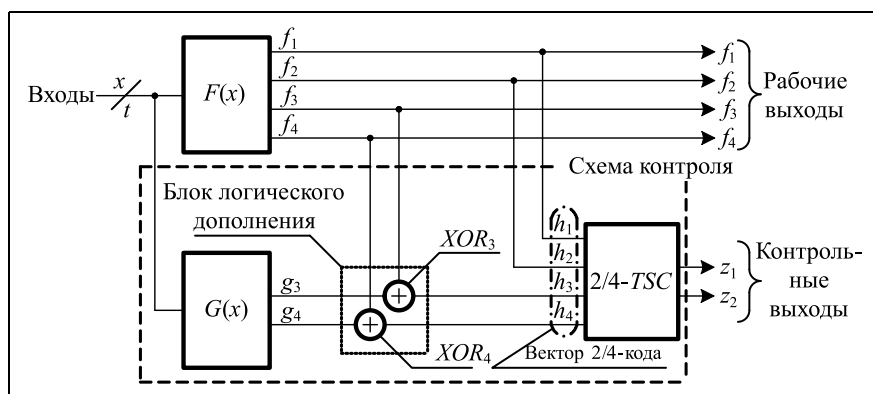


Рис. 3. Структурная схема системы функционального контроля на основе 2/4-кода

мировались все четыре тестовые комбинации, а также хотя бы по разу появлялись все тестовые комбинации 2/4-*TSC* {0011; 1100; 1001; 0110}. Поскольку две рабочие функции f_1 и f_2 не преобразуются в схеме контроля, то их значения соответствуют значениям разрядов h_1 и h_2 вектора 2/4-кода. В табл. 1 представлены все возможные векторы $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, функции логического дополнения и векторы $\langle h_1 h_2 h_3 h_4 \rangle$. Заполнены все клетки, значения в которых соответствуют структуре, представленной на рис. 2, и являются однозначными. Часть клеток остаются пустыми.

В строках с номерами 0—3 формируется вектор 2/4-кода 0011, а в строках с номерами 12—15 — вектор 1100. Для обеспечения свойства полной са-

приведена заполненная таблица функций логического дополнения.

Анализируя табл. 2, нетрудно установить, что помимо необходимых тестовых наборов для 2/4-*TSC* для каждого элемента XOR_3 и XOR_4 хотя бы по одному разу формируются все необходимые тестовые комбинации.

Из табл. 2 следует, что функции логического дополнения определяются по формулам:

$$\begin{cases} g_1 = 0; \\ g_2 = 0; \\ g_3 = f_1 f_3 \vee \bar{f}_1 \bar{f}_3 = \overline{f_1 \oplus f_3} = f_1 \sim f_3; \\ g_4 = f_2 f_4 \vee \bar{f}_2 \bar{f}_4 = \overline{f_2 \oplus f_4} = f_2 \sim f_4. \end{cases} \quad (2)$$

Таблица 1

Базовая таблица функций логического дополнения

№	Вектор рабочих функций				Функции логического дополнения				Вектор 2/4-кода			
	f_1	f_2	f_3	f_4	g_1	g_2	g_3	g_4	h_1	h_2	h_3	h_4
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	1	0	0	0	0			0	1		
5	0	1	0	1	0	0			0	1		
6	0	1	1	0	0	0			0	1		
7	0	1	1	1	0	0			0	1		
8	1	0	0	0	0	0			1	0		
9	1	0	0	1	0	0			1	0		
10	1	0	1	0	0	0			1	0		
11	1	0	1	1	0	0			1	0		
12	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
13	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
14	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
15	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0

Таблица 2

Значения функций логического дополнения

№	Вектор рабочих функций				Функции логического дополнения				Вектор 2/4-кода			
	f_1	f_2	f_3	f_4	g_1	g_2	g_3	g_4	h_1	h_2	h_3	h_4
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1
1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0
5	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
6	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0
7	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0
8	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
9	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1
10	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
11	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1
12	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
13	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
14	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
15	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0



3. УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛНОЙ САМОПРОВЕРЯЕМОСТИ СТРУКТУРЫ

Из табл. 2 следует, что каждый вектор 2/4-кода, необходимый для проверки 2/4-*TSC*, может формироваться на одном из четырех векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$. Например, вектор $\langle h_1 h_2 h_3 h_4 \rangle = 0011$ формируется на каждом векторе из множества $A_1 = \{0000; 0001; 0010; 0011\}$. В табл. 3 приведены множества A_i , $i \in \{1, 2, 3, 4\}$, для всех четырех наборов проверяющего теста 2/4-*TSC*. Для каждого вектора $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$ в скобках указан его десятичный эквивалент.

Для проверки элемента XOR_3 необходимо подать на его входы (см. рис. 3) четыре входных набора $\langle f_3 g_3 \rangle \in \{00; 01; 10; 11\}$. Из табл. 2 также следует, что формирование каждого такого набора возможно на одном из четырех векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$. Например, набор $\langle f_3 g_3 \rangle = \langle 00 \rangle$ образуется на каждом векторе из множества $B_1 = \{1000; 1001; 1100; 1101\}$. В табл. 4 приведены соответствующие множества B_i , $i \in \{1, 2, 3, 4\}$. В табл. 5 представлены множества D_i , $i \in \{1, 2, 3, 4\}$, содержащие векторы $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, на которых формируются проверяющие наборы $\langle f_4 g_4 \rangle$, необходимые для проверки элемента XOR_4 . Отметим, что в табл. 4 и 5 приведены наборы для формирования всех четырех комбинаций, подаваемых для тестирования элементов блока логического дополнения. Столбцы B_4 и D_4 из данных таблиц могли бы быть исключены с учетом привязки только к функциональным особенностям элементов XOR . Тем не менее, на конечный результат это не повлияет, так как способ определения функций логического дополнения в табл. 2 позволяет сгенерировать все четыре комбинации для каждого элемента XOR «автоматически», исходя из необходимости обеспечения полного множества тестовых комбинаций для 2/4-*TSC*.

Анализ таблиц 2–5 позволяет сформулировать два следующих положения.

Теорема. Структура системы функционального контроля на основе 2/4-кода, построенная в соответствии с рис. 4 на элементах любого базиса, является полностью самопроверяемой тогда и только тогда, когда на выходах контролируемого устройства $F(x)$ формируется множество двоичных векторов W такое, что

$$W \cap A_i \neq \emptyset, \quad W \cap B_i \neq \emptyset, \quad W \cap D_i \neq \emptyset, \\ i \in \{1, 2, 3, 4\}. \quad \blacklozenge$$

Так как минимальное число комбинаций, подача которых на входы 2/4-*TSC* обеспечивает его полную проверку, равно четырем, то справедливо

Утверждение 1. Минимально возможное число векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, при которых в структуре, построенной в соответствии с рис. 3, обеспечивается полная проверка 2/4-*TSC* и элементов XOR , равно четырем. $\blacklozenge$

Рассмотрим табл. 3. Определим число множеств $W(A)$ с мощностью $\mu = 4$ векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, формирование которых на выходах блока $F(x)$ обеспе-

Таблица 3

Распределение векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$ на группы тестовых комбинаций, необходимых для полной проверки 2/4-*TSC*

Тестовые комбинации 2/4- <i>TSC</i>			
0011	0110	1001	1100
Множества векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, на которых формируются проверяющие комбинации			
A_1	A_2	A_3	A_4
0000 (0)	0100 (4)	1000 (8)	1100 (12)
0001 (1)	0101 (5)	1001 (9)	1101 (13)
0010 (2)	0110 (6)	1010 (10)	1110 (14)
0011 (3)	0111 (7)	1011 (11)	1111 (15)

Таблица 4

Распределение векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$ на группы тестовых комбинаций, необходимых для полной проверки элемента XOR_3

Тестовые комбинации XOR_3			
00	01	10	11
Множества векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, на которых формируются проверяющие комбинации			
B_1	B_2	B_3	B_4
1000 (8)	0000 (0)	0010 (2)	1110 (14)
1001 (9)	0001 (1)	0011 (3)	1111 (15)
1100 (12)	0100 (4)	0110 (6)	1010 (10)
1101 (13)	0101 (5)	0111 (7)	1011 (11)

Таблица 5

Распределение векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$ на группы тестовых комбинаций, необходимых для полной проверки элемента XOR_4

Тестовые комбинации XOR_4			
00	01	10	11
Множества векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, на которых формируются проверяющие комбинации			
D_1	D_2	D_3	D_4
0100 (4)	0000 (0)	0001 (1)	0101 (5)
0110 (6)	0010 (2)	0011 (3)	0111 (7)
1100 (12)	1000 (8)	1001 (9)	1101 (13)
1110 (14)	1010 (10)	1011 (11)	1111 (15)

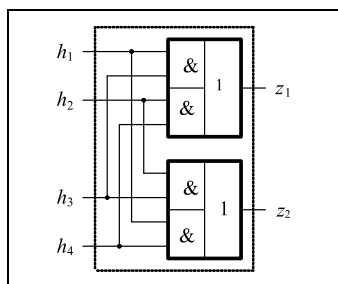


Рис. 4. Структурная схема модуля TRC

чивает полную проверку 2/4-*TSC*. В табл. 6 представлены 16 множеств $W(A)$, содержащих векторы, которым соответствуют десятичные эквиваленты 0 и 4. Такое же число множеств $W(A)$ содержат векторы 0 и 5, а также векторы 0 и 6 и векторы 0 и 7. Общее число множеств $W(A)$, содержащих вектор $\langle 0000 \rangle$, равно 64. Очевидно, что каждый из векторов 0001, 0010 и 0011 также содержится в 64 множествах $W(A)$. Таким образом, общее число множеств $W(A) = 256$.

Так как структуры табл. 4 и 5 совпадают со структурой табл. 3, то число множеств $W(B)$ и $W(D)$ векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, формирование которых на выходах блока $F(x)$ обеспечивает полную проверку соответственно элементов XOR_3 и XOR_4 , также равняется 256. Сравнение множеств $W(A)$, $W(B)$ и $W(D)$ между собой позволило определить, что существует 16 множеств W^4 , содержащих четыре вектора $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, формирование которых на выходе контролируемого блока обеспечивает полную проверку как 2/4-*TSC*, так и обоих элементов XOR . Эти множества приведены в табл. 7.

Утверждение 2. Структура системы функционального контроля на основе 2/4-кода, построенная в соответствии с рис. 4, является полностью самопроверяемой в том случае, если на выходах контролируемого устройства $F(x)$ формируется множество

Таблица 6

Множества $W(A)$

{0;4;8;12}	{0;4;9;12}	{0;4;10;12}	{0;4;11;12}
{0;4;8;13}	{0;4;9;13}	{0;4;10;13}	{0;4;11;13}
{0;4;8;14}	{0;4;9;14}	{0;4;10;14}	{0;4;11;14}
{0;4;8;15}	{0;4;9;15}	{0;4;10;15}	{0;4;11;15}

Таблица 7

Множества W^4

{0;6;9;15}	{1;6;8;15}	{2;4;9;15}	{3;4;8;14}
{0;6;11;13}	{1;6;10;13}	{2;4;11;13}	{3;4;10;13}
{0;7;9;14}	{1;7;8;14}	{2;5;9;14}	{3;5;8;14}
{0;7;11;12}	{1;7;10;12}	{2;5;11;13}	{3;5;10;12}

двоичных векторов W такое, что существует хотя бы одно множество $W^4 \in W$. ♦

4. АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ МНГОВЫХОДНЫХ СХЕМ

Прежде всего отметим, что для получения полностью самопроверяемой структуры комбинационного устройства необходимо с помощью представленных в работах [19, 20] методов преобразовать схему блока $F(x)$ в схему, в которой возможно возникновение на выходах только монотонных искажений.

Если у комбинационного логического устройства большое число выходов, то применение классической схемы функционального контроля (см. рис. 1) связано с решением сложной задачи обеспечения полной проверки самопроверяемого тестера. Для этого строится система с отдельным контролем по группам выходов [23]. В этом случае самопроверяемые тестеры имеют небольшое число входов и, следовательно, не требуют значительного числа входных тестовых воздействий.

Данный подход эффективно реализуется с помощью рассмотренной схемы контроля на основе 2/4-кода. Рассмотрим метод построения системы функционального контроля для устройства, реализующего функции из множества $M = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$.

Алгоритм. Правила построения полностью самопроверяемой структуры системы функционального контроля на основе 2/4-кода.

Шаг 1. На основе случайного или направленного перебора определяются подмножества выходов $\{f_{i_1}, f_{i_2}, f_{i_3}, f_{i_4}\}$, $i_1, i_2, i_3, i_4 \in \{1, 2, \dots, m\}$, отвечающие условию утверждения 2.

Шаг 2. Определяется подмножество выходов M^1 путем исключения из множества M всех выходов, которые вошли в подмножества выходов, полученных на шаге 1.

Шаг 3. На основе случайного или направленного перебора определяются подмножества выходов $\{f_{i_1}, f_{i_2}, f_{i_3}, f_{i_4}\}$, $i_1, i_2, i_3, i_4 \in M^1$, отвечающие условию теоремы.

Шаг 4. Определяется подмножество выходов M^2 путем исключения из множества M^1 всех выходов, которые вошли в подмножества выходов, полученных на шаге 3.

Шаг 5. Далее процесс получения подмножеств $\{f_{i_1}, f_{i_2}, f_{i_3}, f_{i_4}\}$ продолжается для выходов, входящих в множество M^2 , с учетом возможности многократного использования любых выходов. Если в результате формируется некоторое подмножество выходов, которые не могут быть включены в под-

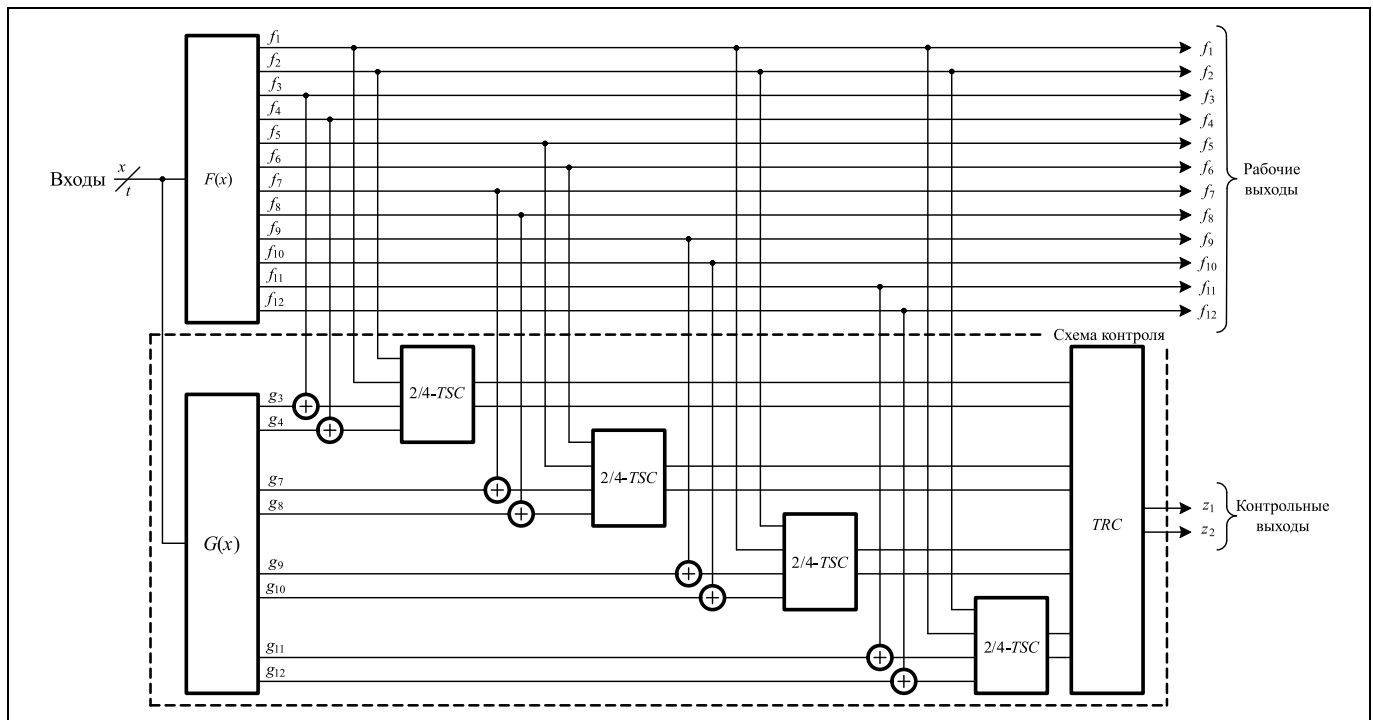


Рис. 5. Полностью самопроверяемая структура для рассматриваемого примера

множества $\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$, отвечающие условиям теоремы, контроль этих выходов осуществляется методами, описанными в работе [16].

Шаг 6. Для контроля технического состояния каждого полученного подмножества «четверок» выходов используются 2/4-TSC, парафазные выходы которых объединяются на входе компаратора TRC, построенного на основе каскадного соединения модулей сжатия парафазных сигналов (рис. 4) [9].

Рассмотрим, например, комбинационное устройство, реализующее 12 функций от трех переменных, представленных в табл. 8.

Анализ позволяет выявить подмножество выходов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, которое отвечает условию утверждения 2. В самом деле, множество $W\{f_1; f_2; f_3; f_4\} = \{0; 5; 6; 9; 15\}$ полностью включает в себя подмножество $W^4 = \{0; 6; 9; 15\}$, представленное в табл. 7.

Исключение из полного множества выходов устройства выходов f_1, f_2, f_3, f_4 образует сокращенное множество выходов $\{f_5, f_6, \dots, f_{12}\}$. Анализ позволяет выявить подмножество выходов $\{f_5, f_6, f_7, f_8\}$, которое не отвечает условию утверждения 2, но отвечает условию теоремы.

Подмножество выходов $W\{f_5; f_6; f_7; f_8\} = \{0; 5; 7; 9; 12; 15\}$ не включает в себя полностью ни одно из множеств W^4 из табл. 7, но содержит хотя бы по одному двоичному вектору из множеств A_i, B_i и D_i ,

$i \in \{1, 2, 3, 4\}$, а именно $0(A_1), 7(A_2), 9(A_3), 15(A_4), 9(B_1), 0(B_2), 7(B_3), 15(B_4), 12(D_1), 0(D_2), 9(D_3), 15(D_4)$.

Выходы $f_9, f_{10}, f_{11}, f_{12}$, которые не вошли в указанные подмножества, образуют подмножество, для которого множество $W\{f_9; f_{10}; f_{11}; f_{12}\} = \{1; 2; 9; 13; 15\}$ не отвечает условию теоремы.

Анализ возможности повторного использования выходов $f_1 \div f_8$ позволяет выявить подмножества $\{f_1, f_2, f_9, f_{10}\}$ ($W\{f_1; f_2; f_9; f_{10}\} = \{3; 4; 8; 12; 14; 15\}$) и $\{f_1, f_2, f_{11}, f_{12}\}$ ($W\{f_1; f_2; f_{11}; f_{12}\} = \{1; 6; 9; 10; 13; 14; 15\}$), которые отвечают условию утверждения 2.

На основании полученных подмножеств $\{f_1, f_2, f_3, f_4\}$ строится полностью самопроверяемая схема, представленная на рис. 5.

Таблица 8

Таблица истинности устройства $F(x)$

$x_1 x_2 x_3$	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}
000	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1
001	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0
010	1	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
011	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
100	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
101	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
110	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
111	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен способ вычисления логических функций дополнения в системе функционального контроля, позволяющий организовать полностью самопроверяемую систему функционального контроля логического дополнения на основе 2/4-кода. Его преимущество, например, перед методом, описанным в работе [16], заключается в отсутствии необходимости подбора значений функций логического дополнения на каждом векторе значений рабочих функций $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$. Единственное требование, предъявляемое к контролируемому объекту, состоит в необходимости формирования на его выходах минимального множества векторов $\langle f_1 f_2 f_3 f_4 \rangle$, необходимых для обеспечения свойства полной самопроверяемости тестера и элементов сложения по модулю два, входящих в структуру системы функционального контроля. Однако это требование не является жестким.

Отметим, что структура системы функционального контроля, представленная на рис. 2, может быть реализована путем дополнения любых двух функций $f_i, f_j, i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$. Кроме того, возможно построение структур (как это отмечено в работе [16]), в которых устанавливаются дополнительные инверторы на некоторых входах $h_1 \div h_4$ тестера 2/4-TSC.

ЛИТЕРАТУРА

1. Согомонян Е.С., Слабаков Е.В. Самопроверяемые устройства и отказоустойчивые системы. — М.: Радио и связь, 1989, 208 с.
2. Goessel M., Graf S. Error Detection Circuits. — London: McGraw-Hill, 1994, 261 p.
3. Fujiwara E. Code Design for Dependable Systems: Theory and Practical Applications. — New Jersey: John Wiley & Sons, 2006, 720 p.
4. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики (оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратные средства). — М.: Энергоатомиздат, 1981, 320 с.
5. Smith J.E., Dussault J. Fault Secure Multiple-Valued Logic Networks // Proceeding of the 8th International Symposium on Multiple-Valued Logic (MVL '78), Los Alamitos, CA, USA, 1978, pp. 287–297.
6. McCluskey E.J. Logic Design Principles: With Emphasis on Testable Semicustom Circuits. — New Jersey: Prentice Hall PTR, 1986. — 549 p.
7. Nicolaidis M., Zorian Y. On-Line Testing for VLSI — A Compendium of Approaches // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1998. — Issue 12. — P. 7–20.
8. Ubar R., Raik J., Vierhaus H.-T. Design and Test Technology for Dependable Systems-on-Chip (Premier Reference Source). — Information Science Reference, Hershey — New York, IGI Global, 2011. — 578 p.
9. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Самопроверяемые дискретные устройства. — СПб: Энергоатомиздат, 1992. — 224 с.
10. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Дмитриев А.В. и др. (Всех 5-х авторов см. в оригинале ст.) Организация функционального контроля комбинационных схем методом логического дополнения // Электронное моделирование. — 2002. — Т. 24. — № 6. — С. 51–66.
11. Гессель М., Морозов А.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Логическое дополнение — новый метод контроля комбинационных схем // Автоматика и телемеханика. — 2003. — № 1. — С. 167–176.
12. Гессель М., Морозов А.В., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Контроль комбинационных схем методом логического дополнения // Автоматика и телемеханика. — 2005. — № 8. — С. 161–172.
13. Gössel M., Ocheretny V., Sogomonyan E., Marienfeld D. New Methods of Concurrent Checking: Edition 1. — Dordrecht: Springer Science + Business Media B.V., 2008. — 184 p.
14. Das D.K., Roy S.S., Dmitriev A., Morozov A., Gössel M. Constraint Don't Cares for Optimizing Designs for Concurrent Checking by 1-out-of-3 Codes // Proceedings of the 10th International Workshops on Boolean Problems, Freiberg, Germany, September, 2012. — P. 33–40.
15. Аксенова Г.П. Необходимые и достаточные условия построения полностью проверяемых схем свертки по модулю два // Автоматика и телемеханика. — 1979. — № 9. — С. 126–135.
16. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Метод функционального контроля комбинационных логических устройств на основе кода «2 из 4» // Известия вузов. Приборостроение. — 2016. — Т. 59, № 7. — С. 524–533.
17. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Ефанов Д.В. Классификация ошибок в информационных векторах систематических кодов // Известия вузов. Приборостроение. — 2015. — Т. 58. — № 5. — С. 333–343.
18. Jha N.K., Vora M.B. A t-unidirectional Error-Detecting Systematic Code // Computers & Mathematics with Application. — 1988. — Vol. 16, iss. 9. — P. 705–714.
19. Busaba F.Y., Lala P.K. Self-Checking Combinational Circuit Design for Single and Unidirectional Multibit Errors // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1994. — Vol. 5, iss. 5. — P. 19–28.
20. Saposhnikov V.V., Morosov A., Saposhnikov V.I., Gössel M. A New Design Method for Self-Checking Unidirectional Combinational Circuits // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. — 1998. — Vol. 12. — Issue 1–2. — P. 41–53.
21. Goessel M., Saposhnikov V.I., Saposhnikov V., Dmitriev A. A New Method for Concurrent Checking by Use of a 1-out-of-4 Code // Proceedings of the 6th IEEE International On-line Testing Workshop, 3–5 July 2000, Palma de Mallorca, Spain, P. 147–152.
22. Saposhnikov V.V., Saposhnikov V.I., Morozov A., Osadtchi G., Gossel M. Design of Totally Self-Checking Combinational Circuits by Use of Complementary Circuits // Proceedings of East-West Design & Test Workshop, Yalta, Ukraine, 2004. — P. 83–87.
23. Гессель М., Морозов А.А., Сапожников В.В., Сапожников Вл.В. Исследование комбинационных самопроверяемых устройств с независимыми и монотонно независимыми выходами // Автоматика и телемеханика. — 1997. — № 2. — С. 180–193.

Статья представлена к публикации членом редсовета чл.-корр. РАН П.П. Пархоменко.

Сапожников Валерий Владимирович — д-р техн. наук, проф.,
✉ port.at.pgups1@gmail.com,

Сапожников Владимир Владимирович — д-р техн. наук, проф.,
✉ at.pgups@gmail.com,

Ефанов Дмитрий Викторович — канд. техн. наук,
✉ TrES-4b@yandex.ru,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

ОЦЕНКА ПРОФЕССИОНАЛЬНО ВАЖНЫХ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕТЧЕРА В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ АСУТП НЕФТЕГАЗОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Л.И. Григорьев, О.Н. Чернышева, В.В. Кучерявый

Рассмотрены проблемы исследования эргатических систем, особенности построения оценок надежности функционирования диспетчеров в автоматизированных системах диспетчерского управления технологическими процессами транспорта нефти и газа, необходимость учета профессионально важных психологических характеристик диспетчерского персонала, требуемых для работы в данной предметной области. Для формирования оценки надежности диспетчеров разработан специальный программный комплекс из психологических тестов и предложена нечеткая модель.

Ключевые слова: нефтегазовая промышленность, автоматизированная система, диспетчерское управление, диспетчерский персонал, эргатическая система, надежность, профессионально важная психологическая характеристика, инженерная психология, психологические тесты, нечеткая модель.

ВВЕДЕНИЕ

За последние 30—40 лет в управлении технологическими процессами широкое развитие получили человеко-машинные (эргатические) системы управления. Особенно это проявилось в управлении непрерывными и технологически опасными процессами, в частности, в электро- и ядерной энергетике, в авиации, в нефтехимической и нефтегазовой промышленности. В автоматизации технологических процессов добычи и трубопроводного транспорта нефти и газа сформировалось качественно новое направление — автоматизированные системы диспетчерского управления (АСДУ).

«АСДУ — это неоднородная (человеко-машинная) система управления технологическим процессом, интегрирующая на АРМ диспетчера профессиональные знания диспетчера с информационно-управляющей системой (ИУС), обеспечивающей автоматический сбор, передачу и отображение информации, а также автоматизирующей все требуемые расчетные процедуры и выполнение управляющих воздействий для достижения поставленной цели в соответствии с заданными критериями» [1].

Современная АСДУ — это система, имеющая иерархическую структуру с высоко автоматизиро-

ванным программно-информационным окружением, которое условно объединено в ИУС.

Сложность и масштаб объектов топливно-энергетического комплекса России, таких как Единая система газоснабжения и нефтяные трубопроводные системы, управление которыми может осуществляться только с помощью иерархии систем оперативно-диспетчерского управления, определяют актуальность решения большого числа комплексных проблем, связанных с исследованием эргатических систем. К ним относятся проблемы подготовки оперативно-диспетчерского персонала, оценки надежности функционирования неоднородных систем, учета профессионально-психологических характеристик диспетчеров, создания стандартов в области диспетчерского управления и др. Эти проблемы связаны между собой, а их решения исходят из многостороннего анализа конкретных человеко-машинных систем управления. Пример подобного анализа в области ядерной энергетики представлен в книге [2].

В фундаментальной работе Б.Ф. Ломова [3] в качестве основных критериев оценки функционирования неоднородных систем управления рекомендуется рассчитывать надежность, быстродействие и точность. Для АСДУ технологическими про-

цессами добычи и транспортировки нефти и газа (имеющими повышенную относительно процессов энергетики инерционность) среди указанных показателей наиболее востребован критерий надежности. Надежность АСДУ нельзя рассматривать без оценки надежности функционирования технологического оборудования, оценки надежности функционирования средств автоматизации, включая информационно-измерительную аппаратуру, средства связи и передачи данных и другие средства автоматизации. Исследования в области оценки надежности объектов нефтегазоснабжения имеют богатую историю, в которой значительной вехой, определяющей системный характер проблемы, стала подготовка справочника по надежности систем энергетики и их оборудования [4].

Интерес к исследованиям по оценке надежности человеко-машинных систем управления естественно появился тогда, когда стало формироваться направление АСДУ; в работе [5] представлена (очевидно, одна из первых) постановка задачи по оценке надежности человеко-машинных систем управления в транспорте газа. Составление и расчет подобных оценок оказывается затруднительным из-за наличия в неоднородных системах управления такого феномена как «человеческий фактор», необходимости учета психологических характеристик и построения на их основе психологического прототипа диспетчера, способного успешно работать в АСДУ.

1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЭРГАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

В АСДУ трубопроводным транспортом углеводородов на верхнем уровне иерархии диспетчеры управляют и координируют деятельность диспетчеров подчиненного им уровня, при этом в большей степени решаются задачи организационного и информационного характера. Непосредственное взаимодействие с технологическими объектами управления осуществляется на нижнем уровне — например, на уровне управления компрессорной станцией или линейным производственным управлением. Естественно, что на этом уровне особенности управления процессом (объектом) в режиме реального времени проявляются существеннее.

Актуальность оценки надежности рассматриваемых человеко-машинных систем управления определяется технологической опасностью процессов транспортировки нефти и газа, а также масштабностью и значением, которые объекты нефтегазовой отрасли имеют для экономики страны. В современных условиях проблеме надежности диспетчера, являющегося элементом уровня автоматизированного управления технологическими

процессами в нефте- и газотранспортных системах, должно уделяться особое внимание; ошибки человека могут привести к существенным последствиям в аварийных ситуациях, а от надежной деятельности диспетчеров во многом зависит эффективность работы нефтегазового комплекса.

Развитие АСДУ способствовало тому, что между объектом управления и диспетчером, как лицом, принимающим решения, появилось несколько слоев приборов, средств связи, программных и компьютерных средств, что наглядно демонстрирует рис. 1, на котором представлена трубопроводная система транспорта углеводородов. В распоряжении диспетчеров нефте- и газотранспортных предприятий находятся мощные информационно-вычислительные комплексы, предназначенные для контроля и управления процессом транспортировки углеводородов. Диспетчерские пункты оснащены программно-техническими комплексами, в число которых входят система диспетчерского контроля и управления, система контроля герметичности трубопровода, система поддержки принятия решений, система контроля нормативных параметров, система контроля гидравлического уклона и др.

На диспетчерский персонал возложены ответственные задачи по обеспечению надежного функционирования систем транспортировки углеводородного сырья. Работа диспетчеров характеризуется высоким уровнем напряженности, связанным с:

- длительными сменами (по 12 ч);
- многообразием выполняемых функций (контроль технологических параметров, управление оборудованием, отслеживание партий углеводородов, контроль производства работ, работа с диспетчерским журналом);
- необходимостью постоянного переключения внимания (между мониторами автоматизированных рабочих мест (АРМ) и видеопанелями различных систем, интерфейсами программных средств);
- значительным объемом поступающей технологической информации, высокой плотностью информационных потоков;
- наличием постоянных специфических внешних визуальных и звуковых раздражителей;
- возможной конфронтацией с организациями, принимающими и сдающими углеводороды, с коллегами по работе.

Напряженность работы диспетчерского персонала еще больше усиливается тем, что деятельность диспетчеров осуществляется не только в штатных, но и в нештатных режимах, а также в экстремальных и аварийных ситуациях. В ритме работы диспетчеров проявляется интегрирующая роль человека.

Несвоевременные или ошибочные действия диспетчеров могут привести к значительным мате-

риальным и экологическим потерям, разрушению оборудования, а также человеческим жертвам.

В области подготовки диспетчерского персонала глубокое развитие получило направление, предполагающее обучение диспетчеров с помощью специализированных компьютерных тренажеров [6, 7].

Необходимо учитывать, что ошибочные действия диспетчеров могут быть вызваны не только недостатками в их подготовке (теоретической, профессиональной), но и индивидуальными психологическими особенностями работников (как элементов эргатической системы [8]), связанными с невнимательностью, пониженной стрессоустойчивостью и др.

Основные особенности эргатических систем связаны с социально-психологическими аспектами. Соответственно главные сложности в исследовании таких систем состоят в анализе и оценке психологических факторов. Как следствие, возникает необходимость применения методик и подходов инженерной психологии.

В этих условиях актуальны системный анализ формирования оценок надежности функционирования АСДУ как неоднородной системы управления и оценка профессионально важных психологических характеристик диспетчеров, необходимых для работы в человеко-машинных системах автоматизированного управления технологическими процессами нефтегазового производства.

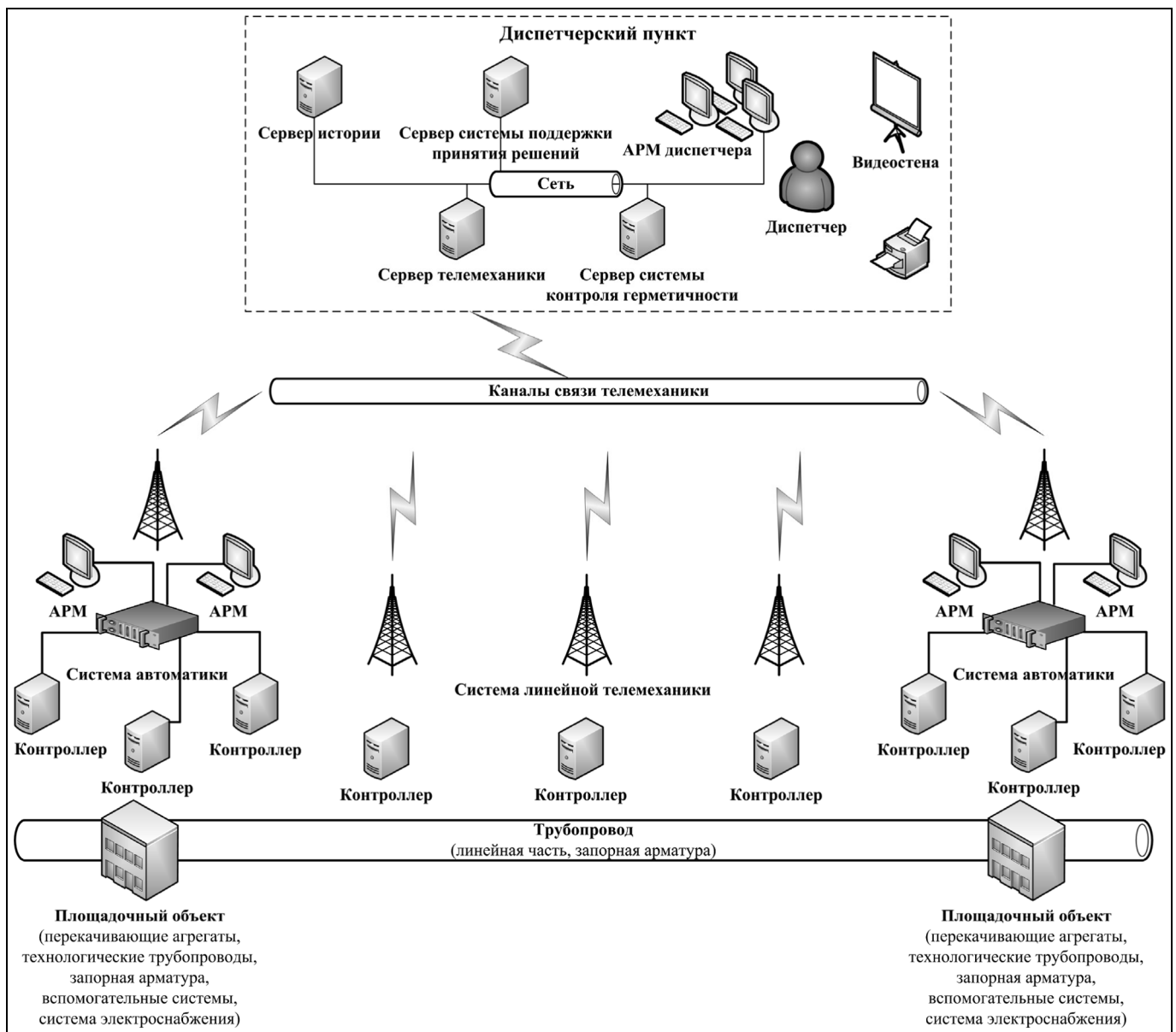


Рис. 1. Схема трубопроводной системы транспорта углеводородов

Пусть в рамках системного подхода рассматриваемая система S — это объект (трубопроводная система транспорта углеводородов) и АСДУ, включающая в себя ИУС и диспетчерский персонал.

Выразим оценку надежности R_s функционирования всей системы в целом как функцию φ от надежности объекта R_o , надежности ИУС R_c и надежности диспетчера R_h : $R_s = \varphi(R_o, R_c, R_h)$.

В рассматриваемом случае (см. рис. 1) объектом оценки является иерархическая структура, в которой на нижнем уровне — технические средства со встроенной автоматикой, на промежуточном уровне — программно-вычислительные средства и связь (условно ИУС). Роль диспетчера двойственна: с одной стороны, диспетчер выступает как компонент АСДУ, с другой стороны, диспетчер интегрирует управление, а эта функция трудно поддается описанию с помощью привычных для расчетов надежности последовательно-параллельных схем соединения.

Проблеме надежности отдельных компонентов рассматриваемого объекта (трубопроводной системы) — газоперекачивающих агрегатов, систем автоматики и телемеханики и др. — посвящено большое число публикаций. В контексте рассматриваемой проблемы интерес представляют работы, в которых исследуется надежность комплексного объекта, включающего в себя объект и систему управления, а оценки надежности формируются на основе информации об отказах [9, 10]. Методы интегральной оценки надежности в АСДУ описаны в работах [5, 11].

Анализируя трудности формирования интегральной оценки надежности АСДУ, важно также знать, насколько такого рода оценка зависит от времени. Формирование оценки надежности предоставляет возможность прогнозирования функционального состояния системы для выявления опасных тенденций, ведущих к авариям.

На основе системного анализа были определены основные проблемы мониторинга надежности АСДУ технологическими процессами добычи и транспортировки углеводородов [12].

2. ПРОФЕССИОНАЛЬНО ВАЖНЫЕ ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ КАЧЕСТВА ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА

В ходе работы был выполнен психологический анализ деятельности диспетчеров, окружающей обстановки и условий их работы [6]. Описание условий труда диспетчерского персонала приведено в § 1.

Психологические исследования проводились непосредственно в диспетчерских пунктах на объектах ПАО «Газпром» в течение всего рабочего дня диспетчеров с привлечением независимых

психологов. В основу работы был положен теоретический и экспериментальный материал по профессиографическому изучению деятельности и психологическим проблемам профессионального обучения. В ходе исследований были разработаны профессиограмма как совокупность знаний о профессии диспетчера и условиях его работы и психограмма как ее психологическая интерпретация.

В результате анализа было установлено, что работа диспетчерского персонала предъявляет особые требования к:

— уровню социальной зрелости работника, выражающемуся в преобладании общественно-значимой мотивации к труду, чувстве ответственности, добросовестности, исполнительности, инициативности;

— уровню социально-психологического взаимодействия с другими людьми (понимание и учет значимости психологических факторов, способность к пониманию других людей, учет их конкретных состояний, способность к сотрудничеству);

— эмоционально-волевой сфере (стрессоустойчивость, стеничность, преобладание положительных эмоций, сдержанность, решительность, выдержка);

— мышлению (устойчивость мыслительных операций в экстремальных ситуациях, возможность принятия решений при недостатке информации);

— памяти (хорошие долговременная и оперативная память);

— вниманию (способность обрабатывать большой объем информации, помехоустойчивость, умение поддерживать высокий уровень сосредоточенности, легкость переключения и распределения внимания);

— восприятию (нормальное функционирование слухового и зрительного анализаторов).

Набор профессионально важных психологических качеств, необходимых и достаточных для успешного выполнения диспетчером своей профессиональной деятельности, предполагает наличие:

- высокого уровня социального развития;
- определенного уровня ценностного отношения к труду;
- психологических предпосылок для продуктивного социально-психологического взаимодействия;
- достаточно высокого уровня развития ряда психических процессов (технического мышления, логической памяти, слухового, зрительного внимания и памяти);
- стрессоустойчивости;
- достаточного уровня энергетического потенциала.

Далее сформулированы критерии наличия выделенных групп профессионально важных психологических качеств.



Критерием наличия высокого уровня социального развития выступают особенности мотивационной сферы, выражающиеся в преобладании социально значимых мотивов профессиональной деятельности.

Критерием наличия ценностного отношения к труду служит выраженность трудовых установок на инициативность, ответственность, исполнительность.

Критерием наличия высокого уровня продуктивного социально-психологического взаимодействия выступают высокие уровни социальной эргичности и пластичности, средний уровень эмоциональной чувствительности.

Критерием наличия высокого уровня развития психических процессов являются продуктивность и прогностичность мышления, сформированность логической памяти, высокий уровень слухового и зрительного внимания и памяти.

Критерием наличия стрессоустойчивости выступают устойчивость мыслительных операций при дефиците времени, эффективность принятия решений в ситуациях неопределенности, оптимальный уровень тревожности.

Критерием наличия высокого энергетического потенциала служит способность вести эффективную деятельность, находиться в хорошем психическом и физическом состоянии в условиях длительных рабочих смен, необходимости работы в разное время суток, переутомления и повышенных эмоциональных нагрузок.

Профессионально важные психологические характеристики, как и критерии их наличия, относятся к качественным характеристикам, поэтому для их описания принимаются лингвистические переменные. По определению, лингвистическая переменная — переменная (которая может быть как входной или выходной, так и переменной состояния) с лингвистическими значениями, выражающими качественные оценки [13].

Сформулированные критерии различаются по своей шкале и размерности, поэтому для всех критериев предусматривается единая шкала градаций — высокий, средний и низкий уровни.

3. НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ И ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНО ВАЖНЫХ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА

Для оценки профпригодности диспетчеров разработан компьютерный комплекс из семи тестов, ориентированных на выявление и оценку степени выраженности выделенных индивидуальных профессионально важных психологических качеств, необходимых и достаточных для успешного выпол-

нения профессиональной деятельности в должности диспетчера.

Из имеющегося в настоящее время большого числа психологических методик и тестов были отобраны тесты, позволяющие оценить требуемые психологические качества. Ниже приведено описание батареи тестов, реализованных в программном комплексе.

Тест 1 направлен на исследование способности концентрации внимания [14]. Успешность выполнения теста дополнительно оценивается с учетом времени, потраченного на выполнение заданий.

Тест 2 (тест сложных аналогий [15]) традиционно применяется для выявления возможностей испытуемого выделять логические связи и отношения между объектами, что является существенной характеристикой мышления. В разработанном диагностическом комплексе в обычную процедуру применения теста внесены изменения, суть которых — в искусственном создании дефицита времени. Результаты работы в таком режиме дают основания для выводов относительно стрессоустойчивости испытуемого, вероятности дезинтеграции интеллектуальной деятельности в условиях стресса.

Тест 3 отражает структуру темперамента. В основе лежит опросник структуры темперамента В.М. Русалова [16]. Модификация опросника предполагает применение интегрированных шкал, в частности, шкалы энергетического потенциала, шкалы социального развития профессионала (интегрирующей шкалы социальной эргичности и социальной пластичности), шкалы стрессоустойчивости (интегрирующей шкалы социальной эмоциональности). Подобная интеграция шкал в большей степени соответствует решению задач, возникающих при оценке диспетчеров.

Тест 4 направлен на оценку действий испытуемого в предлагаемых нештатных ситуациях, связанных с профессиональной деятельностью, а именно, определяются способности диспетчера анализировать состояние технологического объекта и предпринимать действия по переводу объекта в безопасное состояние (рис. 2). Успешность выполнения теста дополнительно оценивается с учетом времени, потраченного на выполнение заданий. Тест дает представление о таких качествах испытуемого, как стрессоустойчивость, способность концентрации и распределения внимания, уровень оперативной памяти, уровень логического мышления.

Тест 5 (тест Беннета на механическую понятливость) [17] позволяет выявить и оценить уровень развития технического мышления. Тест состоит из 70-ти физико-технических заданий, которые представлены в виде рисунков. После текста вопроса следует три варианта ответа, только один из которых правильный (рис. 3). Результаты испытуемого по тесту позволяют сделать вывод о его возмож-

ностях понимать инструктивный материал, разбираться в технологических схемах, решать простейшие технические задачи, самостоятельно выделять логические связи и отношения, создавать на основе сформированной образно-концептуальной модели ситуации алгоритмы работы над заданиями. Успешная работа над тестом предполагает у испытуемого хорошую концентрацию внимания и высокий уровень оперативной памяти.

Тест 6 основан на методике определения уровня субъективного контроля [18]. Результаты его выполнения несут информацию о ценностно-мотивационных отношениях, в частности, чувстве

личной ответственности и самостоятельности субъекта, а также о степени зрелости системы самооценки испытуемого.

Тест 7 разработан на базе колец Ландольта (рис. 4) [19]. При его выполнении оцениваются функции оперативной памяти, а также способность концентрировать, переключать и распределять внимание.

Результаты тестирования конкретного испытуемого приведены на рис. 5.

Компьютерная программа выводит результаты прохождения каждого теста в отдельности, а также формирует и отображает обобщенный (интегри-

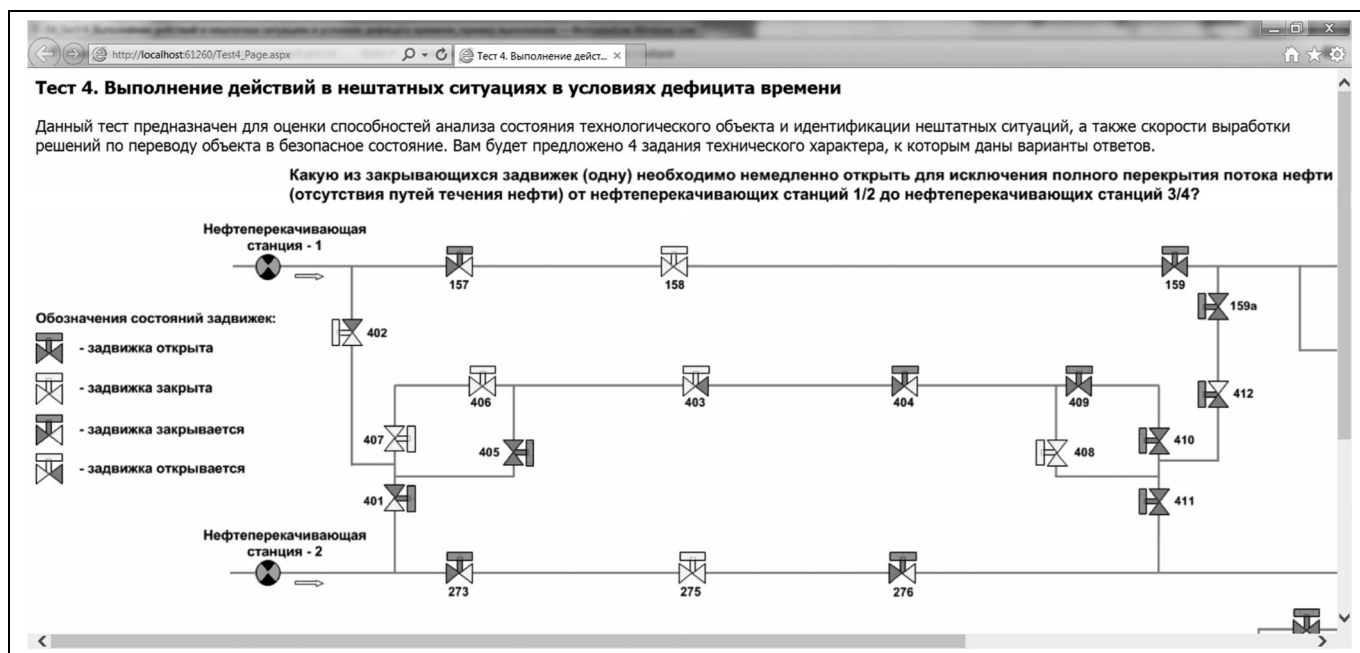


Рис. 2. Тест 4: выполнение действий в нештатных ситуациях в условиях дефицита времени

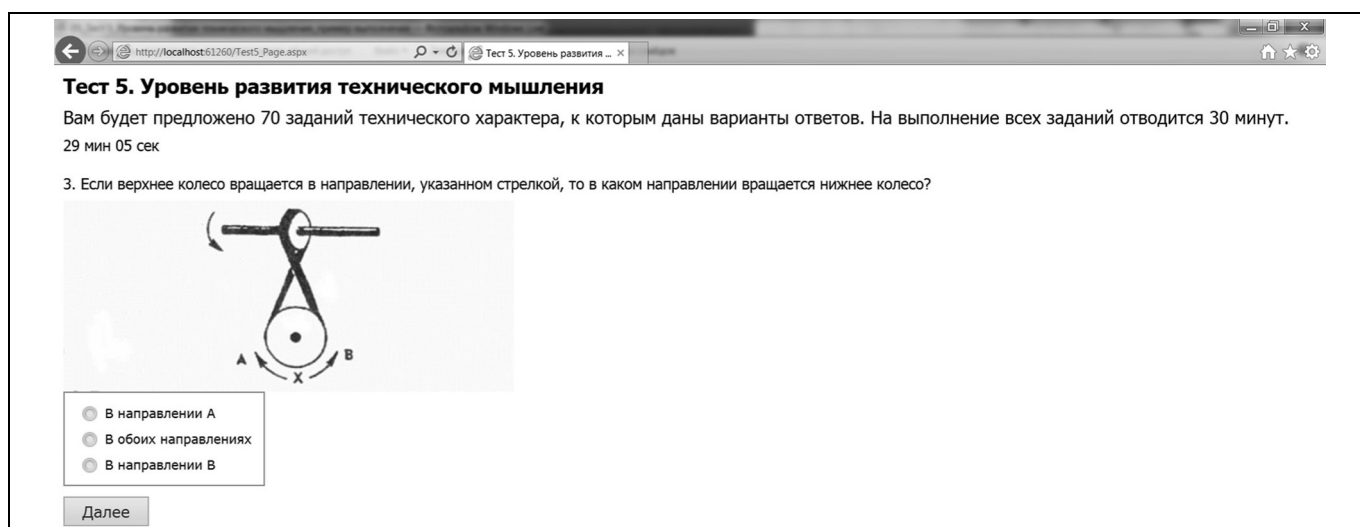


Рис. 3. Тест 3: уровень развития технического мышления

рованный) индекс пригодности испытуемого в качестве работника диспетчерской службы. Окончательные выводы, формируемые на основе тестирования, учитывают корреляцию между результатами отдельных тестов.

Наиболее распространенный способ логического вывода в нечетких системах заключается в следовании модели Мамдани — Заде, в которой

используется минимаксная композиция нечетких множеств. Другие модели, учитывая отсутствие каких-либо дополнительных требований, не рассматривались.

Итак, обобщенный показатель определяется на основе методов нечеткой логики (модель Мамдани — Заде) [13, 20]. При наличии низких результатов прохождения тестов комплекс формирует

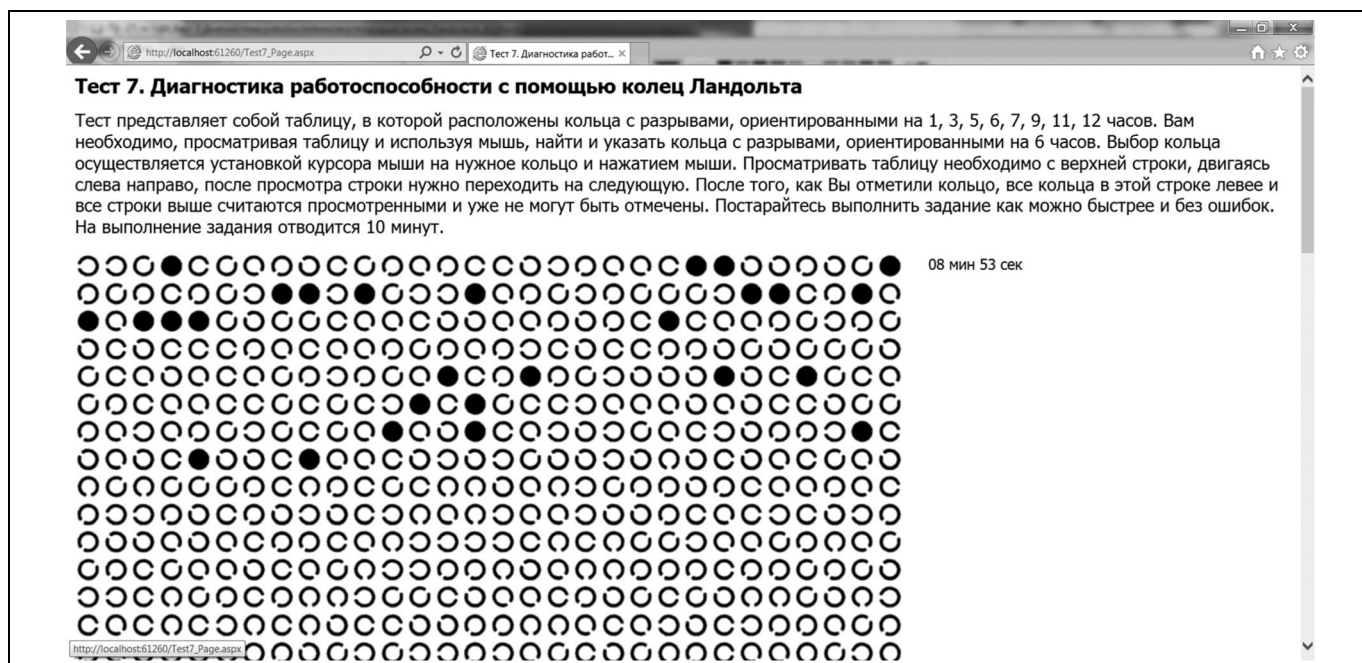


Рис. 4. Тест 7: диагностика работоспособности с помощью колец Ландольта



Рис. 5. Результаты тестирования

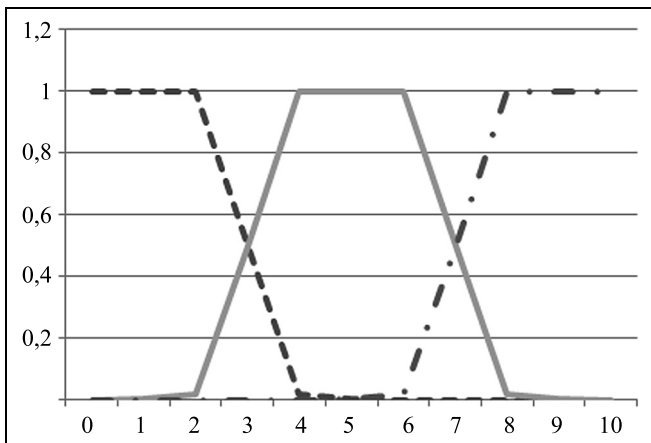


Рис. 6. Функции принадлежности способности концентрации внимания к областям низкой (----), средней (—) и высокой (— · —) способности

рекомендации по повышению профессионально важных психологических качеств испытуемого.

Можно говорить о двух уровнях результатов тестирования: первый отражает успешность работы в штатных условиях, второй — успешность работы в аварийных ситуациях. Высокие результаты по тестам 1, 4 и 7, предполагающим выявление способностей концентрации внимания, позволяют говорить об отсутствии у испытуемого затруднений как в штатных, так и в нештатных ситуациях. При успешных показателях по тесту 1 и неудачах в тестах 4 и 7, оцениваемых с учетом фактора времени, можно судить о возможных проблемах испытуемого при работе в аварийных условиях.

На рис. 6 для примера приведена графическая иллюстрация функций принадлежности лингвистической переменной X — способности концентрации внимания, выявляемой в первом тесте — к трем значениям способности.

Характеристические функции принадлежности способности концентрации внимания к низкому, среднему и высокому уровням имеют вид:

$$\mu_{\text{низк}}(u) = 1/(1 + ((u - 1)/2)^{10}),$$

$$\mu_{\text{сред}}(u) = 1/(1 + ((u - 5)/2)^{10}),$$

$$\mu_{\text{выс}}(u) = 1/(1 + ((u - 9)/2)^{10}),$$

где $u = [0, 10]$ — количественная оценка, полученная испытуемым при прохождении первого теста.

Для остальных тестов, реализованных в программном комплексе, аналогичным образом предусмотрены свои функции принадлежности.

База правил нечеткого вывода применяемой нечеткой модели представляет собой конечное множество нечетких правил, согласованных относительно используемых в них лингвистических переменных:

ПРАВИЛО 1: ЕСЛИ «результат теста 1 = высокий И результат теста 2 = высокий И результат теста 3 = высокий И результат теста 4 = высокий И результат теста 5 = высокий и результат теста 6 = высокий И результат теста 7 = высокий» — ТО «индекс пригодности = высокий» ($F_1 = 1$);

ПРАВИЛО 2: ЕСЛИ «результат теста 1 = средний И результат теста 2 = высокий И результат теста 3 = высокий И результат теста 4 = высокий И результат теста 5 = высокий и результат теста 6 = высокий И результат теста 7 = высокий» — ТО «индекс пригодности = высокий» ($F_2 = 1$);

ПРАВИЛО 3: ЕСЛИ «результат теста 1 = низкий И результат теста 2 = высокий И результат теста 3 = высокий И результат теста 4 = высокий И результат теста 5 = высокий и результат теста 6 = высокий И результат теста 7 = высокий» — ТО «индекс пригодности = средний» ($F_3 = 1$);

...

ПРАВИЛО n : ЕСЛИ «Условие n » — ТО «Заключение n » (F_n).

Через $F_1, F_2, \dots, F_n$ обозначены коэффициенты определенности (весовые коэффициенты) соответствующих правил. База правил составлена таким образом, что при наличии неудачного результата хотя бы по одному из пройденных тестов (вне зависимости от итогов остальных тестов) программа формирует низкий обобщенный индекс пригодности испытуемого (принимается, что испытуемый не справился с тестированием).

Для апробации разработанных методик оценки и программного обеспечения была сформирована группа из пяти тестируемых, в которую вошли как специалисты, имеющие опыт диспетчерского управления, так и инженеры, не работающие непосредственно в диспетчерской службе.

Результаты тестирований, проведенных в разработанном программном комплексе (см. таблицу), показали, что у большинства работников имеются сложности с концентрацией внимания, а успешно выполнить тесты удалось лишь одну из пяти испытуемых.

Полученные результаты не противоречат характеристикам членов тестовой группы и демонстрируют работоспособность разработанной методики оценивания и соответствующего программного обеспечения.

Программа имеет архитектуру «клиент — сервер» и создана в среде разработки «MS Visual Studio» с применением технологии веб-приложений ASP.NET, а также с использованием AJAX и «JavaScript». При этом в такой реализации клиент является «тонким». Предусмотрена интеграция с математическим пакетом MATLAB для осуществления расчетов и вызова методов нечеткой логики. «Логика» программы и вычисления реализова-



Результаты тестирования

Испы- туемый	Тест 1. Показа- тель сте- пени кон- центра- ции вни- мания	Тест 2. Уровень умст- венных спо- собностей в части выявле- ния логиче- ских связей	Тест 3. 1. Эргичность 2. Темп 3. Социальная эргичность 4. Социальная пластичность 5. Эмоциональность	Тест 4. Показатель спо- собности анали- за объекта и сте- пени concentra- ции внимания	Тест 5. Уровень развития общетехни- ческих спо- собностей	Тест 6. Уровень ценностно- мотиваци- онных отно- шений	Тест 7. 1. Скорость перера- ботки информации 2. Средняя продуктивность 3. Выносливость 4. Средняя точность 5. Уровень сохране- ния результатов	Итоговый показатель пригодности, %, рекомендации
1	Высокий	Высокий	1. Высокая 2. Средний 3. Средняя 4. Средняя 5. Низкая	Средний	Очень высокий	Высокий	1. Высокая 2. Средняя 3. Низкая 4. Высокая 5. Высокий	78,86 Рекомендуется выполне- ние упражнений на улуч- шение способностей концентрации внимания
2	Низкий	Средний	Неадекватная оцен- ка своего поведе- ния, желание вы- глядеть лучше, чем есть на самом деле	Высокий				60,29 Рекомендуется выполне- ние упражнений на улуч- шение способностей концентрации внимания
3				Низкий				37,43 Рекомендуется выполне- ние упражнений на улуч- шение способностей концентрации внимания и анализа объектов
4	Высокий	Высокий	1. Высокая 2. Средний 3. Высокая 4. Средняя 5. Низкая	Средний	Очень высокий	Высокий	1. Высокая 2. Средняя 3. Низкая 4. Низкая 5. Низкий	72,29 Рекомендуется выполне- ние упражнений на улуч- шение способностей концентрации внимания
5	Средний		1. Средняя 2. Средний 3. Высокая 4. Средняя 5. Низкая	Высокий				87,14

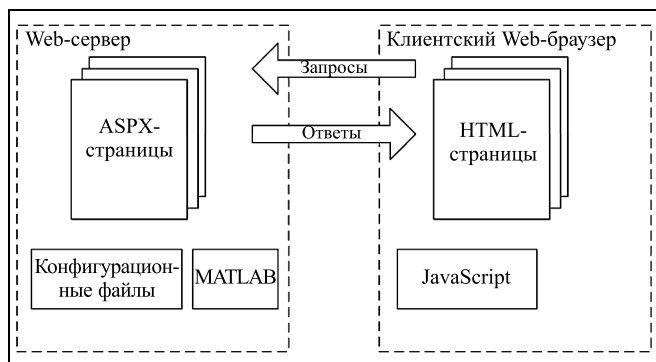


Рис. 7. Структура программного комплекса

ны в составе серверной части системы, пользователь осуществляет взаимодействие с клиентской частью посредством Web-браузера. Структура программного комплекса приведена на рис. 7.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Активное развитие гетерогенных систем управления выявило необходимость оценки надежности функционирования масштабных АСДУ технологическими процессами в нефтегазовом производстве. В настоящей работе рассмотрена актуальная как для науки, так и для производства проблема оценки профессионально важных психологических характеристик диспетчерского персонала.

Надежность диспетчера представляет собой функцию от набора факторов — профессионально важных психологических качеств работника, выявленных в ходе анализа деятельности диспетчерского персонала. Для оценки данных качеств сформулированы соответствующие критерии и составлена батарея психологических тестов, разработано специализированное программное обеспечение, предусматривающее выявление качеств диспетчера с помощью предложенного блока тестов. В программном комплексе реализована методика формирования интегральной оценки диспетчера на основе нечеткой модели Мамдани — Заде. Интегральная оценка может быть использована для расчета надежности функционирования в целом АСДУ, являющейся эргатической системой.

Проведенные исследования могут быть полезны для совершенствования сравнительно недавно утвержденного (Приказ Минтруда России от 26.12.2014 № 1185н) профессионального стандарта «Специалист по диспетчерско-технологическому управлению нефтегазовой отрасли», в котором не учитывается психологическая составляющая деятельности диспетчерского персонала, отсутствуют требования к психологическим качествам персонала и не отражена необходимость оценки психологических характеристик диспетчеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев Л.И. Автоматизированное диспетчерское управление — магистральное направление развития АСУТП газовой отрасли // Газовая промышленность. — 2010. — № 3. — С. 42—46.
2. Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. — М.: Энергоатомиздат, 2001. — 232 с.
3. Ломов Б.Ф. Человек и техника. — М.: Советское радио, 1966. — 27 с.
4. Надежность систем энергетики и их оборудования / Справочник (в четырех томах). — Т. 3 (в двух кн.) Надежность систем газонефтеобеспечения / под ред. М.Г. Сухарева. — М.: Недра, 1994. — Кн. 1. — С. 414; кн. 2. — С. 288.
5. Современные проблемы надежности систем энергетики: модели, рыночные отношения, управление реконструкцией и развитием / под ред. М.Г. Сухарева. — М.: Нефть и газ, 2000. — 251 с.
6. Григорьев Л.И., Сарданашвили С.А., Дятлов В.А. Компьютеризированная система подготовки диспетчерского персонала в транспорте газа. — М.: Нефть и газ, 1996. — 109 с.
7. Дозорцев В.М. Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов. — М.: СИНТЕГ, 2009.
8. Климов Е.А. Введение в психологию труда. — М.: ЮНИТИ, 1998.
9. Кучерявый В.В., Седых И.А. Алгоритм оценки и прогнозирования показателей надежности ГПА и САУ ГПА на основе статистических данных // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2011. — № 6. — С. 16—21.
10. Formation of estimates of reliability indicators for active elements in gas transport systems on the basis of refusals statistics / L. Grigoriev, et al. // Journal of Polish Safety and Reliability Association. — 2014. — Vol. 5, N. 2. — P. 41—47.
11. Григорьев Л.И. К теории автоматизированного диспетчерского управления // Тр. РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. — 2012. — № 3 (268). — С. 124—130.
12. Григорьев Л.И., Микова Е.С., Русев В.Н. Особенности построения мониторинговых систем и оценок показателей производственных процессов для автоматизированного диспетчерского управления в нефтегазовом комплексе // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2014. — № 9. — С. 6—13.
13. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. — М.: Бинном, 2013.
14. Рыбаков Ф.Е. Атлас для экспериментально-психологического исследования личности. — СПб.: Каро, 2008. — 28 с.
15. Римский С.А., Римская Р.Р. Альманах психологических тестов. — М.: КСП+, 1995. — 146 с.
16. Русалов В.М. Опросник структуры темперамента (ОСТ). — М.: ИП АН СССР, 1990. — 50 с.
17. Ахмеджанов Э.Р. Психологические тесты. — М.: Лист, 1996. — 221 с.
18. Бажин Е., Голынкина Е., Эткинд А. Опросник уровня субъективного контроля (УСК). — М., 1993.
19. Сысоев В.Н. Тест Э. Ландольта. Диагностика работоспособности. Метод. рук.-во. — СПб.: ИМАТОН, 2000. — 32 с.
20. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — 288 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

Григорьев Леонид Иванович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, ✉ lgrig@gubkin.ru,

Чернышева Ольга Николаевна — канд. пед. наук, доцент, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ✉ ochern@mail.ru,

Кучерявый Владимир Владимирович — аспирант, Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, ✉ KucheryavyV@gmail.com.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА МЕТОДАМИ ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Л.А. Макриденко, В.Я. Геча, Н.И. Сидняев, В.В. Онуфриев, С.А. Говор

Предложена методика проведения испытаний, основанная на применении теории планирования эксперимента. Выполнен анализ требуемых сочетаний высоты и скорости полета для оптимального управления космическим аппаратом. Представлены соответствующие значения параметров космической среды перед спутником. Получена регрессионная модель расходной характеристики электроракетного двигателя — зависимость его параметров от удельной тяги. Уделено внимание многофакторному подходу к проведению эксперимента при управлении ресурсами двигательной установки. Проиллюстрированы не поочередное, а одновременное изменение от точки к точке плана всех действующих факторов. Получены оптимальные планы многофакторного эксперимента.

Ключевые слова: космический аппарат, двигатель, планирование эксперимента, расходные характеристики, тяга, испытания, точка плана, уравнение, наблюдения.

ВВЕДЕНИЕ

Электроракетное двигателестроение является новой, быстро развивающейся отраслью космического двигателестроения, объединяющего проектирование, отработку и изготовление космических двигательных установок. Электрическими двигательными установками принято называть двигательные установки космических летательных аппаратов (КЛА), предназначенные для выполнения в условиях космического полета баллистического маневра [1]. При полетах КЛА по орбитам спутников небесных тел или по межпланетным траекториям создание необходимых управляющих сил и моментов в целях сохранения параметров орбит (траекторий) и заданного положения КЛА в космическом пространстве представляет собой сложную задачу. Такая задача возникает, например, при околопланетных полетах и при управлении изменением скорости КЛА в целях перевода их с одной орбиты на другую, коррекции орбит, сближения и стыковки аппаратов, управления при обеспечении посадки КЛА на небесные тела, взлета с них и др.,

при межпланетных перелетах сообщения космическим летательным аппаратам необходимых приращений скорости для ухода из сферы действия небесных тел, перевода КЛА с межпланетной орбиты на орбиту спутника небесных тел и др. В работу современных электрических двигательных установок положен принцип создания реактивной движущей силы. Характерный элемент — двигатель, в котором подводимая энергия преобразуется в кинетическую энергию истекающего рабочего вещества и сила реакции, возникающая при истечении, непосредственно служит движущей силой (силой тяги) [2].

В современных КЛА широко применяются двигательные установки с химическими и газовыми реактивными двигателями. В химических двигателях запасенное на борту топливо одновременно служит источником энергии и источником рабочего вещества, а специальные системы преобразования и рассеяния энергии отсутствуют. Рабочий процесс химических двигателей складывается из двух основных стадий: сначала в камере сгорания химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию газообразных продуктов сгорания,

а затем в сопле тепловая энергия переходит в кинетическую энергию реактивной струи газов. Возможные значения эффективной скорости истечения в химических двигателях ограничены как сравнительно малой энергией химических связей, так и высокой молекулярной массой продуктов сгорания. Достижимые эффективные скорости истечения в химических двигателях не превышают 4,5–5,0 км/с.

К настоящему времени электроракетные двигатели (ЭРД) нашли применение в системах ориентации и коррекции различных космических летательных аппаратов [2]. Как в России, так и за рубежом неоднократно проводились летно-космические испытания ЭРД различных классов, на ряде космических объектов ЭРД выполняли рабочие функции. Предусматривается применение ЭРД в перспективных маршевых двигательных установках. Выполненные разработки и летно-космические испытания выявили ряд преимуществ ЭРД по сравнению с двигателями других классов, применяемыми для решения сходных задач, например, по сравнению с газовыми реактивными системами и микро-ЖРД.

Для ряда практически важных задач ЭРД по существу не имеют конкурентов [2]. Их основные преимущества, подтвержденные в процессе исследований и разработок высокий удельный импульс (от 5–10 км/с для электродуговых двигателей до 100 км/с для ионных двигателей), большой ресурс, возможность большого числа включений (сотни — тысячи), предельно малый единичный импульс до 10^{-4} Н и др.

Достигнутый к настоящему времени уровень характеристик ЭРД не является пределом возможного, работы по дальнейшему более углубленному исследованию двигателей и ускорителей продолжают. На новом этапе исследований можно ожидать дальнейших успехов: расширения диапазона стабильной работы ускорителей с высокой эффективностью и низким уровнем колебаний, появления новых разновидностей ускорителей, обладающих принципиально важными преимуществами. Полученные к настоящему времени результаты послужили научным фундаментом, на базе которого были созданы принципиально новые высокоэффективные классы перспективных космических электроракетных двигателей.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Программа испытаний опытного ЭРД обычно включает в себя экспериментальное определение сетки его орбитальных характеристик во всем диа-

пазоне условий полета. Результаты такого эксперимента необходимы для управления и анализа летно-технических данных спутников, поскольку расчетные орбитальные характеристики двигателя, используемые на первых этапах создания спутника, не всегда в полной мере отражают действительное влияние условий полета. Так, например, одним из перспективных ЭРД для корректирующих и маршевых двигательных установок считается электродуговой двигатель, обладающий высоким энергетическим КПД и малой ценой тяги (единицы Вт/мН), что позволит реализовать ЭРД с тягой 110 Н при энергозатратах около 15 кВт. Увеличение удельного импульса электродугового двигателя до 15 км/с (при использовании водорода) позволит создать высокоэффективный ЭРД, конкурирующий с современными электростатическими ЭРД. Вместе с тем, такой двигатель является прямым преемником микро-ЖРД и имеет аналогичный ему рабочий процесс и механизм ускорения потока. Электродуговой двигатель может использоваться в качестве маршевого в задаче доведения космического аппарата на расчетную орбиту. Неоспоримое преимущество электродугового двигателя состоит в использовании дешевого рабочего тела (аммиак, гидразин, водород) по сравнению с электростатическими ЭРД, использующими ксенон; когда суммарная масса рабочего тела может составлять от сотни килограммов до нескольких тонн. Такие, часто весьма существенные, полетные факторы как изменение плотности во всех элементах обтекаемой части, нарушение геометрического подобия из-за термических и упругих деформаций деталей, изменение действительных характеристик системы управления и ограничения режимов и ряд других, учитываются в расчетах недостаточно полно, даже если используемая математическая модель идентифицирована по результатам наземных стендовых испытаний двигателя [2].

Анализ характеристик двигателей такого класса показал, что в ряде случаев, в особенности при сложных законах управления, изменение параметров двигателя не может быть описано уравнениями второго порядка, так как соответствующие кривые содержат точки перегиба и существенно меняют свой вид в заданных пределах изменения факторов. Применение планов эксперимента третьего или четвертого порядка связано со значительным увеличением числа опытов и в данной задаче нерационально. В настоящей статье проанализирован способ, позволяющий в таких случаях ограничиться экономными планами второго порядка (композиционными или почти *D*-оптимальными) для нахождения в процессе эксперимента квадратичных поправок к некоторой базовой ха-



рактеристике заранее описываемой уравнением любой необходимой сложности. Но, вместе с тем, отметим, что при планировании эксперимента даже незначительная погрешность отклонений приведенных параметров от базовых характеристик (обычно отклонение не превышает 5...10 %) лишь в малой степени отразится на точности определения абсолютного значения параметра.

Орбитальные характеристики двигателя определяются путем измерения его параметров на различных режимах на специальном высотном стенде, позволяющем создать тягу в двигателе p_v^* и расход топлива G_v^* , равные их значениям в полете на заданной высоте H с заданной скоростью V (числом Маха M), а за соплом двигателя — давление p_H , равное атмосферному давлению на этой высоте.

Традиционная методика проведения испытаний сводится к следующему. Выбирается одно из требуемых сочетаний высоты и скорости полета, устанавливаются соответствующие значения параметров космической среды перед спутником и в этих условиях определяется дроссельная характеристика двигателя — зависимость его параметров от удельной тяги p_v^* . После этого меняется высота (или скорость) полета космического аппарата, соответственно корректируются параметры воздуха на баллистической траектории спутника и вновь определяется дроссельная характеристика и т. д. Другими словами, испытания сводятся к серии однофакторных экспериментов, в каждом из которых изучается влияние удельного расхода двигателя при постоянстве остальных определяющих параметров [3]. При таком подходе для получения сетки баллистических характеристик двигателя на различных режимах требуется определить (в зависимости от заданного диапазона условий полета) не менее 8—10 дроссельных характеристик, на каждой из которых обычно снимается 5—6 точек при разных удельных тягах; объем эксперимента получается достаточно большим. Между тем, испытания по определению высотно-скоростных характеристик по своему существу представляют собой задачу, при решении которой возможно эффективное применение методов теории планирования эксперимента (ТПЭ), позволяющих получить требуемые результаты при существенном сокращении необходимого числа опытов [4].

Основная особенность всех методов ТПЭ, как известно, заключается в многофакторном подходе к проведению эксперимента, предусматривающем не поочередное, а одновременное изменение от точки к точке всех действующих факторов. Разработанные в теории методы составления оптимальных планов многофакторного эксперимента позволяют выбрать для проведения опытов наиболее

информативные сочетания значений определяющих факторов и обоснованно назначить число опытов, необходимое и достаточное для получения результата с требуемой полнотой и точностью. Результаты опытов, проведенных в соответствии с многофакторным планом, обрабатываются так, чтобы по измеренным значениям определить коэффициенты уравнения регрессии заранее выбранного вида (обычно полинома) и получить, таким образом, математическое описание зависимости изучаемых параметров или характеристик объекта (функций отклика) от определяющих факторов и их взаимодействий [5].

Применительно к рассматриваемой задаче определения баллистических параметров многофакторный план эксперимента означает, что при испытаниях на высотном стенде от точки к точке надо менять не только тягу двигателя, как при традиционном подходе, но одновременно и параметры, характеризующие высоту и скорость полета. Первичные результаты испытания при этом не представляют собой каких-либо характеристик, а являются набором экспериментальных точек, соответствующих различным сочетаниям значений H , V и p_v^* , из которых искомые характеристики определяются только после специальной математической обработки. Реализация такого подхода к ответственному и дорогостоящему эксперименту на двигателе требовала преодоления известного психологического барьера, поскольку она противоречила прочно установившейся и проверенной многолетней практикой методике высотных испытаний.

2. ПОСТРОЕНИЕ ПЛАНА ЭКСПЕРИМЕНТА. РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ

При испытаниях на высотном стенде ЭРД были применены методы теории планирования эксперимента. Согласно программе требовалось определить изменение основных параметров в зависимости от тяги двигателя ($p_v^* = 15 \cdot 10^{-2}$ Н) диапазоне высот 200—250 км при постоянном числе Маха M набегающего потока [6]. Эти условия означают, что при испытаниях температура торможения на входе в двигатель должна сохраняться постоянной, а изменение высоты полета имитируются изменением полного давления воздуха на входе, причем требуется изменять и давление в барокамере p_H соответственно тяге p_v^* , сохраняя постоянным зависящее от числа M набегающего потока отношение p_v^*/p_H . Поэтому в качестве факторов были выбраны две независимые, управляемые и хорошо контролируемые величины — удельная тяга p_v^* и полное давление воздуха p_H . Функциями

отклика служили основные параметры двигателя — реактивная тяга и расход топлива. Результаты наблюдений, проведенных в соответствии с многофакторным планом, обрабатывались так, чтобы по измеренным величинам определить коэффициенты уравнения регрессии заранее выбранного вида (обычно полинома) и получить, таким образом, математическое описание зависимости изучаемых параметров или характеристик объекта (функций отклика) от определяющих факторов и их взаимодействий.

Анализ ранее полученных экспериментальных, а также расчетных высотных характеристик показал, что исследуемые зависимости в указанных диапазонах изменения факторов могут быть хорошо аппроксимированы параболой. Исходя из этого, для проведения опытов был принят двухфакторный композиционный ротatableльный план второго порядка [6, 7], состоящий, как известно, из девяти точек (опытов), расположенных в факторной плоскости в вершинах квадрата, в центре и на осях координат на расстоянии «звездного» плеча $\alpha = \sqrt{2} \approx 1,414$ от центра [8].

Связь между физическими значениями факторов в точках плана $p_H(z_1)$ и $p_B^*(z_2)$ и их безразмер-

ными (кодированными) значениями x_1 и x_2 определяется из соотношения

$$x_i = \frac{z_i - z_{i0}}{\Delta z_i},$$

где $z_{i0} = (z_{i\max} + z_{i\min})/2$ — нулевое значение и $\Delta z_i = (z_{i\max} - z_{i\min})/2$ — интервал варьирования. В соответствии с обычной методикой в качестве факторов — их в данном случае три — были приняты тяга p , высота H и число Маха M набегающего потока (табл. 1). Диапазон изменения этих величин был задан программой $H = 200 \div 250$ км; $M = 22 \div 25$; $p = 10^{-2} \div 15^{-2}$ Н. В данном случае используются новые переменные: $X_1 = H$, $X_2 = M$, $X_3 = p$.

Далее осуществляется переход к кодированным переменным:

$$x_1 = \frac{X_1 - 225}{25}, \quad x_2 = \frac{X_2 - 23,5}{1,5}, \quad x_3 = \frac{X_3 - 1,25}{0,5}.$$

Постулируемая модель представлена в виде полинома:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3,$$

где y — расход, мг/с. Для этого полинома необходимо найти неизвестные коэффициенты. Соответственно строится матрица плана с дублированным экспериментом (табл. 2).

В представленной модели наблюдения удовлетворяют следующим условиям.

- Результаты эксперимента свободны от систематических ошибок или, иными словами, математическое ожидание величины y_i равно действительному значению выхода в точке x^i : $M\{y_i\} = f^{i'}(x)$ б, т. е. $M\{\varepsilon_i\} = 0$.
- Результат наблюдения в точке x^i не зависит от результата в точке x^j , т. е. наблюдения некоррелированные.
- Дисперсия наблюдений во всех точках x^i одинакова, т. е. $D\{y_i\} = \sigma^2$ для всех i или $D\{\varepsilon_i\} = \sigma^2$ для всех i .

С учетом этих условий постулируемую модель для всех наблюдений можно записать в матричном виде: $Y = Xb + \varepsilon$; $M\{\varepsilon\} = 0$; $D\{\varepsilon\} = \sigma^2 I_N$, где $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N)'$ — случайный вектор, I_N — единичная матрица. Это выражение описывает линейную модель с некоррелированными наблюдениями.

Таблица 1

Диапазоны изменения факторов

Факторы	Высота, км, X_1	Число Маха, X_2	Тяга, 10^{-2} Н, X_3
Основной уровень (нулевой)	225	23,5	1,25
Нижний уровень (−1)	200	22	1
Верхний уровень (+ 1)	250	25	1,5
Шаг варьирования	25	1,5	0,5

Таблица 2

Кодированные факторы и их взаимодействия

№	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1'	y_1''
1		—	—		+	+		—	1,546	1,406
2		+	—		—	—		+	1,453	1,403
3		—	+			+			1,434	1,34
4		+	+		+	—	—	—	1,334	1,301
5		—	—					+	1,321	1,296
6		+	—			+			1,251	1,251
7		—	+		—	—		—	1,234	1,234
8		+	+		+	+	+	+	1,152	1,052

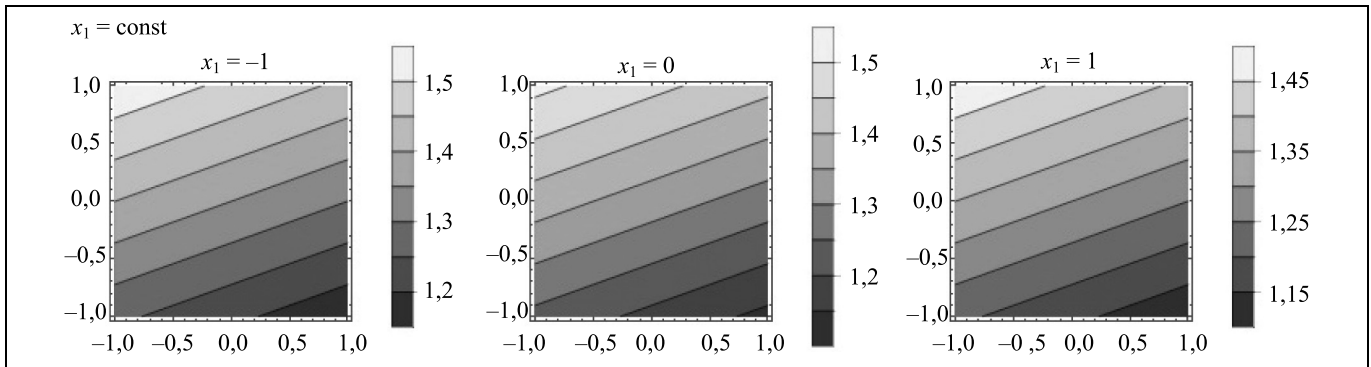


Рис. 1. Линии уровня при фиксировании первого фактора — высоты

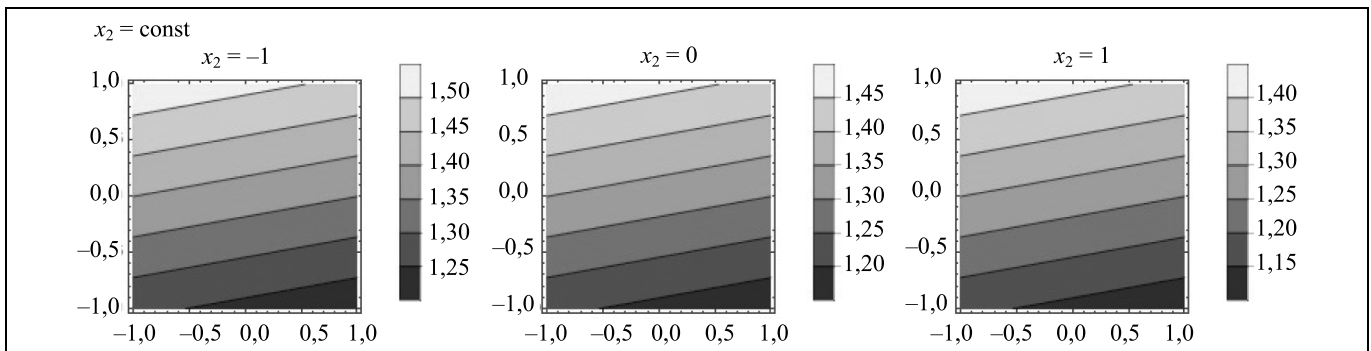


Рис. 2. Линии уровня при фиксировании второго фактора — числа Маха

Задача состоит в том, чтобы найти оценку $\hat{b}$ вектора b . Для этого будем рассматривать класс линейных оценок, образуемых линейными комбинациями результатов наблюдений y_i .

Рассмотрим функционал

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - \tilde{y}_i)^2 = |Y - \tilde{Y}|^2 = (Y - \tilde{Y})(Y - \tilde{Y}),$$

где Y — вектор наблюдений; $\tilde{Y} = Xb$ — вектор истинных значений выхода.

Значение $\hat{b}$, минимизирующее представленный функционал при наблюдаемых значениях $y_1, y_2, \dots, y_N$, называется оценкой метода наименьших квадратов (МНК-оценкой) неизвестного параметра b . Таким образом, $S(\hat{b}) = \min_b S(b)$.

Очевидно, что этот функционал можно записать как $S = S(b) = Y'Y + b'X'Xb - 2Y'Xb$. Здесь S — расширенная квадратичная форма b , которая в случае невырожденности матрицы $X'X$ имеет единственный минимум при $b = \hat{b} = (X'X)^{-1}X'Y$. Матрица

$X'X$ невырожденная, т. е. $\det(X'X) \neq 0$, если матрица X имеет ранг $k + 1$.

Матрица $C = (X'X)^{-1}$ размера $(k + 1) \times (k + 1)$ есть дисперсионная матрица. Таким образом, $\hat{b} = CX'Y$. Соответствующие уравнения с рассчитанными коэффициентами представлены в виде:

$$y'_1 = 1,341 - 0,043x_1 - 0,052x_2 - 0,101x_3 - 2,375 \cdot 10^{-3}x_1x_2 + 5,125 \cdot 10^{-3}x_1x_3 + 5,625 \cdot 10^{-3}x_2x_3 - 6,25 \cdot 10^{-4}x_1x_2x_3,$$

$$y''_1 = 1,285 - 0,034x_1 - 0,054x_2 - 0,077x_3 - 0,022x_1x_2 - 0,023x_1x_3 - 0,012x_2x_3 - 0,013x_1x_2x_3.$$

В табл. 2 представлены расчетные значения расходных характеристик y'_1 и y''_1 при первом и втором продублированном эксперименте. Анализируя полученные уравнения регрессии и поверхность отклика (рис. 1—3), можно сделать вывод, что межфакторное взаимодействие незначительное. Наибольшее воздействие на характеристики двигателя при управлении оказывает высота, затем число Маха и тяга.

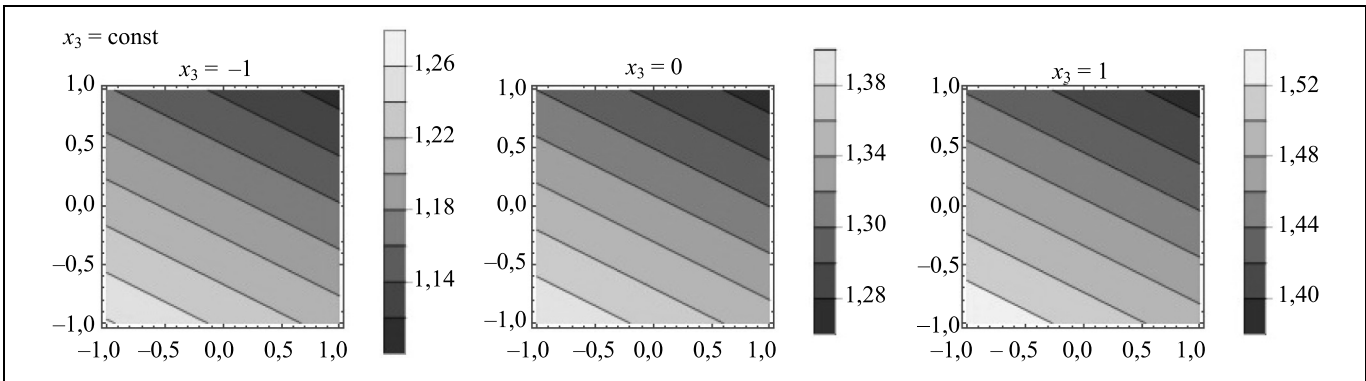


Рис. 3. Линии уровня при фиксировании третьего фактора — тяги

Здесь матрица плана и вектор исходных данных при дублировании эксперимента имеет вид [8]:

$$X = \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & -1 \\ 1 & -1 & 0,5 & 1 & -0,5 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, y_1 = \begin{pmatrix} 1,5 \\ 1,45 \\ 1,4 \\ 1,33 \\ 1,3 \\ 1,25 \\ 1,2 \\ 1,15 \end{pmatrix}.$$

В данном случае две вершины заменены на точки с координатами (1; 1; 0,5) и (-1; 0,5; 1). Аналитическая зависимость примет вид:

$$y = 1,323 - 0,028x_1 + 0,191x_2 + 0,152x_3 - 0,246x_1x_2 + 0,252x_1x_3 + 0,252x_2x_3 + 0,00025x_1x_2x_3.$$

Далее приведен пример построения ортогонального центрального композиционного плана (ОЦКП) второго порядка для $n = 2$ (рис. 4). Постулируется математическая модель вида

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_3(x_1^2 - a) + b_4(x_2^2 - a).$$

Коэффициенты регрессионной модели в этом случае вычисляются по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}.$$

Параметры плана $N_0 = 4$, $N = 9$, $\alpha = 1,414$, $a = 2/3$, $1 - a = 1/3$, $\alpha^2 - a = 1,339$, откуда константа преобразования

$$a = \sqrt{\frac{N_0}{N}} = \sqrt{\frac{2^n}{2^n + 2n + n_0}}.$$

В ОЦКП каждый фактор в общем случае фиксируется на пяти уровнях $(-\alpha, -1, 0, +1, +\alpha)$ (табл. 3). В табл. 4 приведены кодированные и соответствующие им физические значения факторов в точках плана.

Коэффициенты полинома $b_0 = 4$, $b_1 = 0$, $b_2 = 0,138$, $b_{12} = 0,5$, $b_3 = 3$, $b_4 = 0$. Переменные

$$x_1 = \frac{M - 225}{25} \text{ и } x_2 = \frac{p - 1,25}{0,5}.$$

Полученное регрессионное уравнение принимает вид: $\hat{y} = 4 + 0,138x_2 + 1,5x_1x_2 + 3(x_1^2 - 0,67)$. Соответствующие регрессионные кривые при раз-

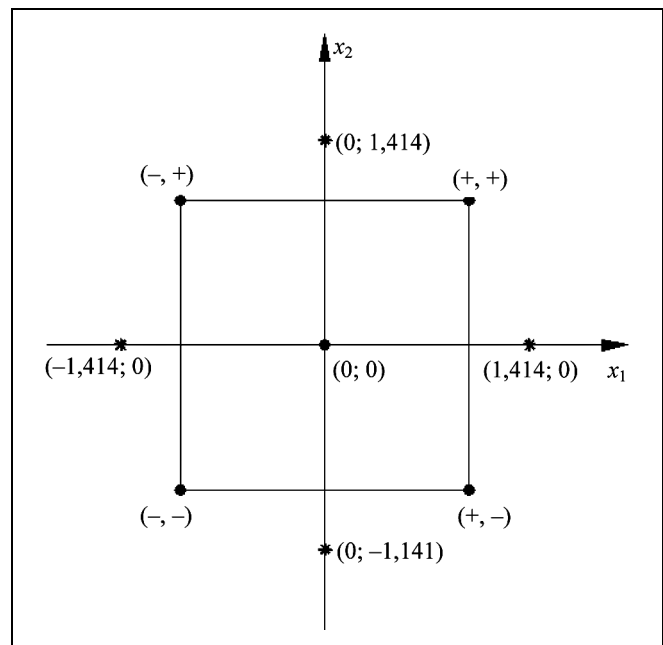


Рис. 4. Расположение «звездных» точек композиционного плана второго порядка для двух факторов



личных вариациях параметров представлены на рис. 5 и 6.

Полезно рассмотреть случай при одновременном варьировании трех факторов ($n = 3$). Зададимся значениями орбитальных характеристик: $H = 200 \div 250$ км; $M = 22 \div 25$; $p = 1 \div 1,5 \cdot 10^{-2}$ Н.

Постулируемая регрессионная модель в этом случае имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2,$$

$$N_0 = 8, \quad N = 15, \quad \alpha = 1,68,$$

$$c = (N_0 + 2\alpha^2)/N = 0,7,$$

Таблица 3

Уровни плана

Уровень x	Высота H , км	Тяга p , 10^{-2} Н
$+\alpha$	251,4	0,4
$+$	250	1
0	225	1,25
$-$	200	1,5
$-\alpha$	198,6	2,9

Таблица 4

Композиционный план

№	x_0	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y	$\hat{y}$
1	+	—	—	+	1/3	1/3	6	6,352
2		+	—	—			3	6,352
3		—	+	—			4	6,628
4		+	+	+			7	6,628
5		—1,414	0	—	-2/3	-2/3	5	10,95362
6		1,414	0	—			5	11,07105
7		0	—1,414	0			1	10,95362
8		0	1,414	0			3	11,07105
9		0	0	0			2	1,989211

Таблица 5

Уровни плана

Уровень x	Высота H , км	Число Маха M	Тяга p , 10^{-2} Н
$+\alpha$	251,2	26,2	0,2
$+$	250	25	1
0	225	23,5	1,25
$-$	200	22	1,5
$-\alpha$	198,8	20,8	2,7

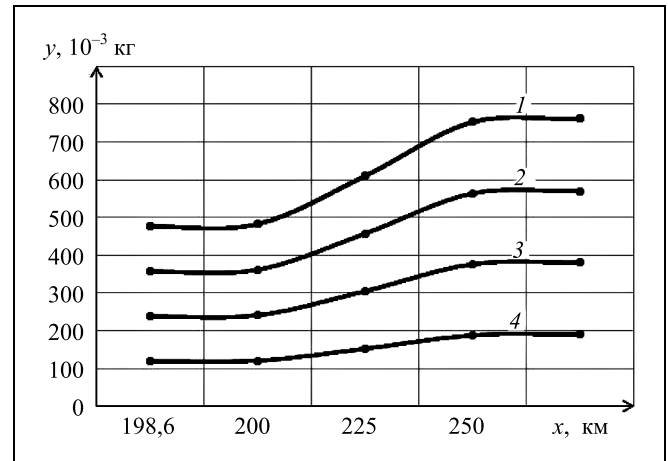


Рис. 5. Зависимость функции отклика от влияющих факторов при фиксированных значениях тяги: 1 — $x_2 = 1$; 2 — $x_2 = 1,25$; 3 — $x_2 = 1,5$; 4 — $x_2 = 2,9$

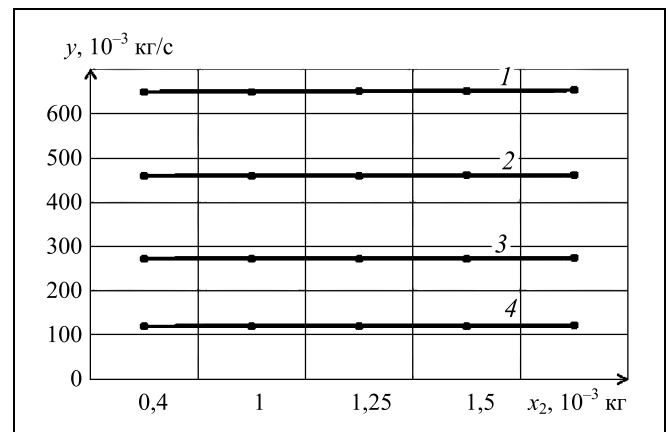


Рис. 6. Зависимость функции отклика от влияющих факторов при фиксированных значениях высоты полета: 1 — $H = 251,4$; 2 — $H = 250$; 3 — $H = 225$; 4 — $H = 200$

в ОЦКП второго порядка каждый фактор в общем случае фиксируется на пяти уровнях ($+\alpha$, $+$, 0 , $-$, $-\alpha$). В табл. 5 приведены кодированные и соответствующие им физические значения факторов в точках плана (табл. 6). На рис. 7 и 8 указаны точки плана, где проводились вычисления.

После вычисления коэффициентов полинома и анализа окончательно регрессионная модель примет вид:

$$y = 4,5 + 0,68x_1 + 0,2x_2 + 0,12x_3 + x_1x_2 + 0,5x_1x_3 + 0,75x_2x_3 + 2,95x_1^2 + 2,15x_2^2 + 3,35x_3^2.$$

Результаты измерений, проведенных в точках плана при незначительном отличии действительных значений факторов от указанных на рис. 7 и

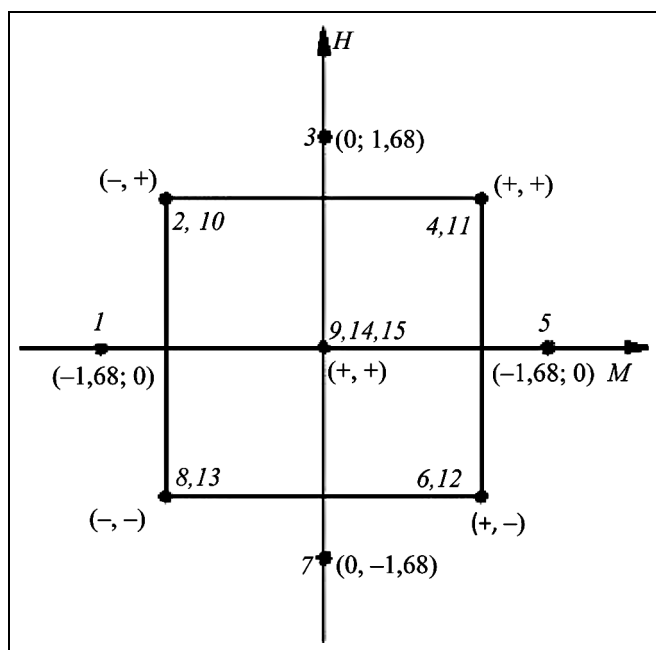


Рис. 7. Расположение «звездных» точек композиционного плана второго порядка для двух факторов

в табл. 6, были использованы для определения коэффициентов уравнений регрессии b_i по общим формулам, приведенным, например, в работе [7].

После проверки по t -критерию абсолютных значений полученных коэффициентов и исключения статистически незначимых членов (т. е. находящихся в пределах возможной погрешности их вычисления) уравнения регрессии принимаются в окончательном виде. Проверка по F -критерию показывает, что уравнения адекватно описывают результаты эксперимента. Заменяя в уравнениях кодированные значения факторов физическими, получаем выражения, с помощью которых можно рассчитать сколь угодно подробную сетку высотных расходных и тяговых характеристик в исследованном диапазоне изменения параметров космической среды. Для более наглядной прямой проверки уравнений регрессии можно дополнительно к точкам плана, в условиях, соответствующих минимальной и максимальной высотам полета, обычным способом снять две дроссельные характеристики. При обычном подходе в данной задаче для получения результатов потребовалось бы снять не менее четырех дроссельных характеристик, т. е. провести примерно 20—25 опытов.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многофакторный план даже в рассмотренной простой задаче позволяет сократить необходимый объем эксперимента примерно вдвое (с учетом

Таблица 6

Композиционный план второго порядка

№	Матрица независимых переменных												
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y		
1	+	—	—	—	+	+	+	0,3	0,3	0,3	8		
2		+			—	—					4		
3		—			+	+					3		
4		+	+			7							
5		—	—	+	—	—	5						
6		+			+		7						
7		—	+		—		7						
8		+			+		9						
9		—1,215	0	0	0	0	0	0,8	—0,3	2			
10		1,215								4			
11		0	—1,215							—0,3	0,8	1	
12			1,215									1	
13			0	—1,215				—0,3	—0,3			0,8	6
14				1,215									2
15				0						—0,3	2		

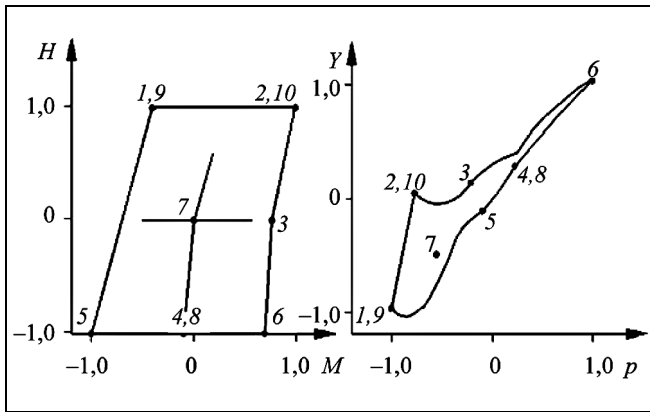


Рис. 8. Сочетания параметров H , M , p и Y в точках плана эксперимента при изменении условий полета

нескольких повторных опытов для оценки дисперсии воспроизводимости); при большем числе факторов эффективность методов ТПЭ будет еще большей.

Первые положительные результаты, полученные в настоящей работе, позволят перейти к применению методов ТПЭ для решения более сложной задачи — определения управляющих параметров высотно-скоростных характеристик ЭРД.

Отметим, что для описания расчетных высотно-скоростных характеристик ЭРД достаточно уравнения второго порядка с взаимодействиями. Поэтому в эксперименте может быть применен ротатбельный композиционный план второго порядка, включающий в себя 15 опытов при различных сочетаниях величин H , M , p_v^* . Определение коэффициентов уравнения одновременно по всем снятым экспериментальным точкам, т. е. построение общей для всех снятых точек поверхности отклика, имеет важные преимущества по сравнению с построением обычных однофакторных зависимостей [8].

При известном из теории снижении дисперсии определения коэффициентов уравнения регрессии — повышении точности оценки влияния отдельных факторов и их взаимодействий — по остаточным разностям легко обнаруживаются выпадающие точки, где при наблюдениях или первичной обработке были допущены грубые ошибки. На кривых (дрессельных характеристиках), построенных по небольшому числу точек однофакторного эксперимента, такие ошибки могут остаться незамеченными, однако при перестроении характеристик, например, по числу M или высоте при постоянном давлении, могут привести к неверным выводам [8]. В данной работе указанные соображения позволили устранить несколько ошибок и

значительно уменьшить остаточную дисперсию. Данные, полученные в этом эксперименте по 12-ти опытам, при традиционной методике потребовали бы снятия дрессельных характеристик по меньшей мере на трех-четыре значениях высоты и трех числах M на каждой из них, т. е. примерно втрое большего числа опытов [7].

Анализ материалов эксперимента показал, что в качестве фактора целесообразно выбирать не физическую, а удельную тягу p_v^* , являющуюся критерием газодинамического подобия режима. Дело в том, что при использовании в качестве фактора физического параметра при расчете орбитальных характеристик по уравнению регрессии происходит, по существу, экстраполяция данных по удельной тяге, что всегда сопряжено со снижением точности. Такое положение обычно имеет место, поскольку в точках композиционного плана (см. рис. 5) отсутствуют сочетания предельных значений факторов, в частности, наименьшей температуры T_v^* (т. е. малых чисел M на большой высоте) и максимальной физической тяги. С этой точки зрения может быть более целесообразным применение планов Бокса [7], которые по существу являются композиционными планами со «звездным» плечом $\alpha = 1$. Соображения подобия режимов оказываются существенными и при оценке других величин, применяемых в качестве факторов в рассматриваемом эксперименте.

Отметим, что факторы должны быть управляемыми, так как в противном случае невозможно проводить эксперимент в соответствии с заданным планом. Например, такой фактор, как плотность на высоте не является управляемым, его следует отнести к шумовому фону. Далее, факторы должны быть совместными и функционально независимыми. Например, рассматривая такие переменные, как высоту H , число Маха M и давление окружающей среды, в качестве факторов можно взять любые два из трех (например, высоту H и число Маха M), так как все три переменные связаны функциональной зависимостью. При симметричном и ортогональном (относительно начала координат высоты H и числа Маха M) расположении точек плана эксперимента указанные факторы значительно коррелированы при изменении тяги p_v^* и температуры T_v^* .

Корреляция реальных управляемых факторов p_v^* и T_v^* нарушает одно из условий оптимального планирования — независимость факторов. Особенно сильно проявилась корреляция определяющих параметров при анализе плана испытаний двигателя сложной схемы, когда требовалось определить высотно-скоростные характеристики в

широком диапазоне изменения высоты и скорости полета. Кроме того, здесь имеется известная свобода выбора, поскольку известно, что для основной части полетных режимов ЭРД, когда сверхкритический перепад давлений в сопле достаточен для стабилизации коэффициента расхода, величина p_H не влияет на параметры рабочего процесса и расход топлива, а измеренная на стенде тяга легко приводится к любому требуемому значению p_H .

Специфика ЭРД как объекта испытаний создает дополнительные трудности при формировании плана эксперимента, поскольку реальные ограничения режимов работы во многих случаях не позволяют определить параметры двигателя при предельных сочетаниях факторов — отдельные точки оптимального плана не реализуемы из-за несовместимости значений факторов [9]. При испытаниях ЭРД со штатной системой автоматики и управления указанные сочетания параметров просто не будут реализованы. Вместо них можно снять предельные точки на режимах ограничения соответствующих параметров, однако при этом как план эксперимента, так и построенное по его результатам уравнение регрессии потеряет ряд ценных качеств — симметрии, ортогональности или ротатабельности, понизится точность вычисления коэффициентов, возрастет смешивание эффектов. Более целесообразно применение известных из теории несимметричных планов, например, насыщенных почти D -оптимальных планов [7], обеспечивающих наряду с достаточной информативностью также некоторое сокращение числа опытов по сравнению с композиционными планами второго порядка. Почти D -оптимальный трехфакторный план, который может быть применен для определения высотно-скоростных характеристик ЭРД, содержит 10 экспериментальных точек (вместо 15-ти в композиционном плане) (см. рис. 8), причем в нем отсутствуют четыре точки, соответствующие вершинам куба, т. е. четырем предельным сочетаниям факторов. Надлежащим образом ориентируя значения факторов по осям куба, можно таким образом избежать нереализуемых режимов наблюдений. Если этого окажется недостаточно, можно воспользоваться поворотом осей координат, чтобы обеспечить совместимость факторов во всех точках плана без уменьшения интервала варьирования факторов.

Отметим, что с развитием методов и автоматизацией испытаний ЭРД на высотных стендах можно будет применительно к каждой конкретной программе испытаний решать задачу о рациональном размещении заданного числа экспериментальных точек в несимметричной или сложно

организованной области изменения факторов, т. е. о формировании оптимального плана испытания с оценкой его качества по информационной матрице Фишера. Это одновременно позволит решить практически важную задачу о рациональном (минимальном) дополнении заданных основной программой режимов испытаний опытного двигателя в заявленных полетных условиях с тем, чтобы полученные результаты позволили не только проверить соответствие двигателя техническим условиям, но и построить сетку его высотно-скоростных характеристик [9].

В качестве базовой характеристики можно принять, например, земную (полученную в условиях $H = 0$, $M = 0$) дроссельную характеристику, а функции отклика представлять в виде отклонения приведенных параметров $\delta y = f(p_B^*, H, M)$, где

$$\delta y = \frac{y_{\text{пр}} - y_0}{y_0}.$$

Здесь $y_{\text{пр}}$ — величина, измеренная в точке плана и приведенная по обычным формулам при $H = 0$, $M = 0$, y_0 — базовое значение при том же значении p_B^* .

Следует иметь в виду, что наличие на земной дроссельной характеристике режимов с докритическим отношением давлений в сопле приведет к значительному увеличению полетной поправки δy в левой части дроссельных характеристик. Чтобы избежать этого, можно в качестве базовой принять какую-либо из высотно-скоростных дроссельных характеристик, для удобства приведенную к стандартным земным атмосферным условиям [9].

Указанное представление функции отклика заметно снижает требования к точности описания результатов эксперимента. Действительно, даже значительная погрешность отклонений приведенного параметра от базовой характеристики (обычно размер отклонения не превышает) 5÷10 % лишь в малой степени отразится на точности определения абсолютной величины параметра. Заметим, что функция отклика в виде δy по существу является экспериментальной поправкой к формулам приведения в исследованном диапазоне изменения высотно-скоростных условий. Формулы приведения с экспериментально полученными поправками для одного двигателя могут быть использованы для любого экземпляра двигателя той же партии или даже близкой модификации. Тогда для расчета орбитальных характеристик конкретного двигателя достаточно знать его земную дроссельную характеристику (например, по данным приемосдаточных испытаний). Изложенные результа-



ты свидетельствуют о том, что применение методов математического планирования эксперимента действительно позволяет повысить информативность одного из важных видов испытаний электрических ракетных двигателей на высотных стендах и должно внедряться в практику [10]. Специальной проработки, конечно, потребует оптимальное планирование аналогичных испытаний применительно к современным ЭРД со сложными законами регулирования и ограничения режимов, в особенности для определения орбитальных характеристик на различных режимах работы двигателей. Некоторые изложенные выше общие соображения могут быть полезными при подготовке таких испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что ЭРД в зависимости от условий может работать в различных режимах, каждый из которых отличается специфическими особенностями. Ускорение плазмы в ЭРД в типичных условиях происходит при одновременном действии различных механизмов. Такой характер процессов в ЭРД, с одной стороны, усложняет регулирование его характеристик, а также затрудняет его расчет. К настоящему времени удалось развить удовлетворительные методы расчета лишь для отдельных частных случаев высотных характеристик. С другой стороны, возможность использования различных режимов управления работой двигателя, несомненно, расширяет практические возможности его применения при управлении космическим аппаратом на орбите. Так, например, вклад газодинамических и диссипативных механизмов ускорения позволяет получать скорости истечения, которые превосходят величину, определяемую приложенной разностью потенциалов. Изложенные результаты свидетельствуют о том, что применение методов математического планирования эксперимента действительно позволяет повысить информативность одного из важных видов испытаний ЭРД на высотных стендах и должно внедряться в практику. Применение планов третьего или четвертого порядка связано со значительным увеличением числа опытов и для решения данной задачи нерационально. Предложенный способ позволяет ограничиться экономными планами второго порядка (композиционными или почти D -оптимальными) для нахождения в процессе эксперимента квадратичных поправок к некоторой базовой характеристике, заранее описываемой уравнением любой необходимой сложности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гильзин К.А. Электрические межпланетные корабли. — М.: Наука, 1970. — 432 с.
2. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1989. — 216 с.
3. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. — М.: Наука, 1965.
4. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / Под ред. Э.К. Лецкого. — М.: Мир, 1977.
5. Черкез А.Я. Возможности применения теории планирования эксперимента при испытаниях и доводке ГТД // Испытания авиационных двигателей. Сб. ст. — Уфа: УАИ, 1975. — Вып. 3.
6. Лурье В.Б., Рыбко В.А., Казанцев В.С. Испытания ТРД на высотном стенде с использованием методов статистического планирования эксперимента / Там же.
7. Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Введение в теорию планирования эксперимента: уч. пособие. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. — 463 с.
8. Сидняев Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие. — М.: Юрайт, 2011. — 399 с.
9. Макриденко Л.А., Геча В.Я., Сидняев Н.И., Онуфриев В.Н. Факторы космической погоды, влияющие на бортовые элементы низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. Тр. четвертой междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». — М., 2016. — С. 90—102.
10. Макриденко Л.А., Геча В.Я., Сидняев Н.И., Онуфриев В.Н. Аэромеханика низкоорбитальных космических аппаратов // Там же. — С. 103—114.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Макриденко Леонид Алексеевич — д-р техн. наук, ген. директор, АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна»; ген. директор, «VNIEM Corporation» JSC, г. Москва, ✉ vniiem@orc.ru, vniiem@vniiem.ru,

Геча Владимир Яковлевич — д-р техн. наук, зам. ген. директора, АО «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А.Г. Иосифьяна»; зам. ген. директора, «VNIEM Corporation» JSC, г. Москва, ✉ vniiem@orc.ru, vniiem@vniiem.ru,

Сидняев Николай Иванович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ✉ Sidn_ni@mail.ru,

Онуфриев Валерий Валентинович — д-р техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ✉ onufryev@bmstu.ru,

Говор Светлана Александровна — аспирант, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, ✉ govov_sa@mail.ru.



Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН осуществляет подготовку (по очной и заочной форме) научных кадров в аспирантуре

Перечень направлений подготовки в аспирантуре ИПУ РАН:

■ **01.06.01. Математика и механика**

Специальность:

01.01.02 Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление

■ **09.06.01 Информатика и вычислительная техника**

Специальности:

05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)

05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

05.13.10 Управление в социальных и экономических системах

05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей

05.13.12 Системы автоматизации проектирования (по отраслям)

05.13.15 Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети

05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

■ **38.06.01 Экономика**

Специальности:

08.00.05 Экономика и управление народным хозяйством (по отраслям и сферам деятельности, в том числе управление инновациями)

08.00.13 Математические и инструментальные методы экономики

Сроки обучения:

В очной аспирантуре — 4 года (по направлению подготовки 38.06.01 — 3 года); в заочной аспирантуре — 5 лет (по направлению подготовки 38.06.01 — 4 года).

Институт имеет бессрочную лицензию на высшее образование и государственную аккредитацию.

**Прием документов в аспирантуру с 1 июля по 30 сентября.
Зачисление в аспирантуру по результатам конкурса до 1 ноября.
Иногородним аспирантам предоставляется общежитие.**

В Институте читаются лекции для аспирантов по следующим программам:

- эконометрический анализ экономического развития (д-р экон. наук Р.М. Нижегородцев);
- моделирование систем управления (д-р техн. наук А.Л. Генкин);
- теория робастного управления (д-р техн. наук А.П. Курдюков);
- вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети (д-р техн. наук В.М. Вишневский);
- системы автоматизации проектирования (д-р техн. наук А.В. Толок).



Не забудьте подписаться!

Подписку на журнал «Проблемы управления» можно оформить в любом почтовом отделении (подписной индекс 81708 в каталоге Роспечати или 38006 в объединенном каталоге «Пресса России»), а также через редакцию с любого месяца, при этом почтовые расходы редакция берет на себя. Отдельные номера редакция высылает по первому требованию.

СИСТЕМА ОПЕРАТОР



Продукты и технологии

- программно-технические решения для верхнего уровня АСУТП;
- SCADA (с адаптацией под требования заказчика);
- операционные системы для АСУ (поставка готовых и изготовление по ТЗ);
- технологии интеграции АСУ из разнородных систем автоматики;
- технологии и продукты для разработки и контроля безопасных и защищенных АСУТП;
- простые и сложные пульта управления для АСУ с 1 млн. сигналов и более;
- средства оценки кибербезопасности;
- поддержка работы на процессорах X86 и ARM, RISC;
- разработаны в соответствии с POSIX и ЕСПД.

Особенности:

- собственная разработка;
- "атомное" качество;
- масштабируемость (1 млн. сигналов и более);
- долговременная поддержка российских разработчиков;
- доступные исходные коды;
- кибербезопасность;
- поставки за рубеж.

Услуги

- разработка программно-технических компонентов и комплексов: верхний/средний уровень / встраиваемые системы;
- верификация и валидация АСУ, включая исходные тексты, по качеству/информационной безопасности;
- разработка ПО для проектного анализа контролепригодности, технической эффективности, надежности, техногенной безопасности технических систем;
- анализ эксплуатационной готовности технологических комплексов;
- анализ кибербезопасности;
- консультации специалистов;
- обучение.

Разработки внедрены на АЭС "Бушер", Исламская Республика Иран и АЭС "Куданкулам", Республика Индия.

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ им. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ул. Профсоюзная, 65, 117997, Москва, Россия.

телефон: +7 (495) 334-89-10; факс: +7 (495) 334-93-40, +7 (499) 234-64-26

e-mail: ipu31@mail.ru, poletik@inbox.ru

<http://www.ipu.ru>

CONTENTS & ABSTRACTS

A SIMPLE NOMINAL CLASSIFICATION ALGORITHM BASED ON QUALITATIVE FEATURES 2

Kornoushenko E.K.

An alternative approach to classifying is proposed based on nominal qualitative features. This approach differs from conventional approaches in that instead of comparing test object features tuple with similar features tuples of training sample objects, the independent pairwise comparison is performed for each pair of values in corresponding tuples of objects features. This allows to form the matrix of features weights for each test object that is more detailed than the test object nearest neighborhood. In this approach the simple classification algorithm is suggested, that has a number of important features in respect of classification results interpretation. The quality of the algorithm is tested on an imbalanced sample taken from the known UCI repository. It is shown that the algorithm provides good objects classification accuracy for «small» classes.

Keywords: classification, nearest neighborhood, class label, vote weighting, feature weighting, feature weight matrix.

SEARCH FOR COURNOT EQUILIBRIUM ON THE HEAT ENERGY MARKET IN THE CONDITIONS OF HEAT SOURCES COMPETITIVE BEHAVIOUR 10

Stennikov V.A., Penkovskii A.V., Khamisov O.V.

The «Single buyer» organizational model is considered on the market of heat energy. The mathematical model is developed, in which the corresponding to Nash equilibrium optimum load distribution among the heat sources is defined on the basis of Cournot approach. It is noted that the mathematical model allows to take into account the heat energy production and transportation costs as well as physical and technical properties of the heat supply systems. The heat supply system with three heat sources is examined using the model developed.

Keywords: heat supply system, market of heat energy, «Single buyer» model, optimization, Cournot — Nash equilibrium.

MODELS OF ENTERPRISE HEADCOUNT MANAGEMENT USING DYNAMIC PROGRAMMING METHOD 19

Belov M.V.

The paper is devoted to the enterprise headcount management problem, taking into account the uncertainty of business and the uncertainty of employee turnover (dismissal and hiring processes). Problem is stated in three ways, each reflecting the specific business management practice: the stationary and non-stationary management assumptions concerning business development, and the case with minimum a priori information that requires robust solutions. The method of dynamic programming with probabilistic and interval uncertainty models is applied to obtain an analytical solution. The absence of additional assumptions about the properties of business uncertainty and traffic of employees (others than the limits of acceptable values ranges) provides the robustness of obtained analytical solution of interval task and significantly enhances its practical value.

Ключевые слова: Dynamic programming; probabilistic uncertainty; interval uncertainty; headcount management; human capital management.

THE RESEARCH OF NEURAL NETWORKS APPLICATION POSSIBILITY IN SOLVING TEAM SELECTION PROBLEM FOR PROJECT IMPLEMENTATION 31

Asanov A.Z., Myshkina I.Yu.

The problem is considered of applying various types of neural networks to project team members' assessment and selection for project tasks implementation. It is suggested to use cognitive map to obtain concrete estimations of correspondence between performers' competence and individual project tasks and to form the training sample. The method is given of the required expert estimations collecting and processing. It is pointed out that the technique can be applied to determine the cognitive map's parameters and to assess the competence of possible performers. The clustered rankings coordination algorithm is used to coordinate experts' opinions.

Keywords: project, competence, cognitive map, neural networks.

INTANGIBLE ASSETS MANAGEMENT SISTEM EXPERT ANALYSIS WITH RISK ASSESSMENT 40

Gusev V.B., Isaeva N.A.

The procedures are developed, intended for the analyzing the consequences of the interaction of intangible assets and management factors taking into account the risk assessment based on expert data. The analysis

method is considered, being based on reflexive inference procedures for obtaining transitive closure of interaction and risk assessments with the using the multi-valued logic.

Keywords: management factor, intangible asset, assessment, degree of influence, risk, transitive closure, reflexive inference procedure.

THE COMPUTER NETWORK WITH DISTRIBUTED FAST CHANGING OF STRUCTURE, AND WITH DATA PROCESSING DURING TRANSMISSION 47

Stetsyura G.G.

Considered is the computer network with advanced functional features. The network structure is a complete graph, but only the connections demanded at the moment are formed. These connections reorganize quickly, that allows changing their structure repeatedly within the task solving. It is shown that this significantly simplifies and accelerates the massive operations with simultaneous participation of many system devices. The network allows performing several types of distributed calculations immediately during the process of data transmission over the network. The examples of network application and network main components technical construction are given.

Keywords: wireless optical network, dynamic reconfiguration, network calculations, distributed synchronization, barrier synchronization.

DESIGN OF SELF-CHECKING CONCURRENT ERROR DETECTION SYSTEMS BASED ON «2-OUT-OF-4» CONSTANT-WEIGHT CODE 57

Sapozhnikov V.V., Sapozhnikov V.I., Efanov D.V.

The method of Boolean complement is considered for concurrent error detection systems design based on «2-out-of-4» constant-weight code. Formalized are the rules of computing the Boolean complement functions to transform any operating output vector in concurrent error detection system into «2-out-of-4» code word. Necessary and sufficient conditions are formulated for controlled logical device to provide the total self-checkability feature of concurrent error detection system.

Keywords: concurrent error detection system, Boolean complement, 2-out-of-4 code, totally self-checking system, testing.

EVALUATION OF PROFESSIONALLY SIGNIFICANT PSYCHOLOGICAL CHARACTERISTICS OF SUPERVISOR IN HUMAN-MACHINE SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AUTOMATIC CONTROL IN OIL-GAS INDUSTRY. 65

Grigoriev L.I., Chernisheva O.N., Kucheryaviy V.V.

Considered are the ergatic systems research problems, the formation features of supervisors functioning reliability evaluation in automatic supervisory control systems of oil and gas transportation technological processes, the necessity of taking into account the supervisory personnel professionally significant psychological characteristics that are required to work in this subject field. Special psychological tests software package is developed to form the estimate of supervisors' reliability and the fuzzy model is suggested.

Keywords: oil-gas industry, automatic supervisory control system, supervisory control, supervisory personnel, ergatic systems, reliability, professionally significant psychological characteristic, engineering psychology, psychological tests, fuzzy models.

DETERMINATION OF SPACECRAFT ELECTRIC JET ENGINES ALTITUDE PERFORMANCE WITH THE METHODS OF EXPERIMENTAL DESIGN . . . 75

Makridenko L.A., Gecha V.J., Sidnyaev N.I., et al.

The testing technique is suggested, based on the theory of experimental design. The analysis is carried out of flight altitude and speed combinations required for optimal spacecraft control. The relevant values of space environment parameters in front of the satellite are presented. The regression model is obtained of electric jet engine flow characteristics — its parameters dependence on the specific thrust. Attention is paid to multifactorial approach to the experiment performed while managing the propulsion device resources. Illustrated is not successive, but simultaneous change of all relevant factors from one design point to another. Optimal designs of multifactorial experiment are obtained.

Keywords: spacecraft, engine, experiment planning, flow characteristics, thrust, test, point, plan, equation, observation.

МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КРИТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ НА ЭТАПАХ ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ САМОЛЕТА

На этапах взлета и посадки воздушных судов происходит более 50% летных происшествий.

Предпосылки неправильных или ошибочных действий экипажа заключаются в высоких психологических нагрузках и необходимости принятия ответственных решений на основе субъективной оценки ситуации.

В целях повышения безопасности воздушных перевозок в ИПУ РАН разработаны алгоритмические и программные средства информационной поддержки экипажа, в том числе:

- алгоритмы оценки текущего и прогнозирования будущего движения воздушного судна по взлетно-посадочной полосе;
- оповещения пилота о наступлении критических событий на взлетно-посадочных этапах полета;
- рекомендации по выполнению или прерыванию типовых полетных процедур.

Все разработки базируются на *энергетическом подходе к управлению движением*

Математическая формулировка подхода -- УРАВНЕНИЕ БАЛАНСА ЭНЕРГИЙ:

ЭНЕРГИЯ
САМОЛЕТА

= f

ТЯГА
ДВИГАТЕЛЯ

АЭРОДИНАМИКА

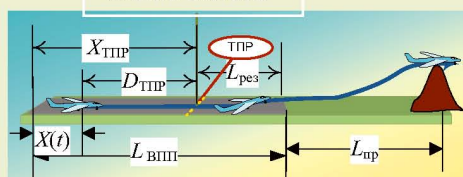
ВЕТЕР

СИЛЫ ТОРМОЖЕНИЯ

)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОГО ВЗЛЕТА ПРИ НАЛИЧИИ ПРЕПЯТСТВИЙ

Схема взлета



Алгоритм прогнозирования дальности до начала подъема носового колеса

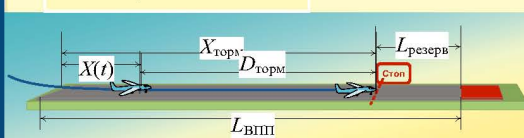
$$D_{V_{\text{п.ст}}} = 0,5 \left((V_{\text{п.ст}})^2 - V(t)^2 \right) / g n_x(t)$$

Прогноз дальности до точки принятия решения (ТПР)

$$D_{\text{ТПР}}(t) = \left(g \left(H_{\text{преп}} - h(t) \right) + 0,5 \left(V_2^2 - V(t)^2 \right) \right) / g n_x(t) - L_{\text{преп}}$$

Этап торможения

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОГО ТОРМОЖЕНИЯ



Прогноз дальности до точки останова

$$D_{\text{торм}} = 0,5 \left(V(t)^2 - \varepsilon^2 \right) / g n_x(t)$$

Коррекция прогноза

$$D_{\text{торм_кор}} = Q_{\text{кор}} D_{\text{торм}} \quad Q_{\text{кор}} = Q_{\text{кор}}(J_i, k_{\text{торм}}, V)$$

Окно настроек моделирующего стенда

Статистические испытания алгоритмов прогнозирования на всем множестве взлетно-посадочных режимов показали их высокую достоверность.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Профсоюзная ул., д. 65, Москва, 117997

✉ anshev@ipu.ru ☎ (495) 334-90-39



Материал подготовлен канд. техн. наук А.М. Шевченко

