

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

6/2018

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.М. Вишневский, д-р экон. наук М.И. Гераськин, д-р экон. наук В.В. Ключков, 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-ра техн. наук А.С. Мандель, Р.В. Мещеряков, д-р биол. наук А.И. Михальский, чл.-корр. РАН Д.А. Новиков (гл. редактор), д-ра техн. наук Б.В. Павлов, Ф.Ф. Пащенко (зам. гл. редактора), д-р физ.-мат. наук Л.Б. Рапопорт, д-р экон. наук С.В. Ратнер, 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

Н.Е. Максимова

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>

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

Фото на четвертой странице обложки
В.М. Бабинова

Отпечатано в ООО «Авансд солишнз»

Заказ № PB618

Подписано в печать
15.11.2018 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

6.2018

СОДЕРЖАНИЕ

Обзоры

- Гусев В.Б. Модели автономного управления в развивающихся системах 2
- Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В. Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 1. Традиционные подходы к проблеме 18

Управление в социально-экономических системах

- Гранин С.С., Мандель А.С. Оптимизация процесса управления запасами в цепи поставок при наличии альтернативных поставщиков 24
- Блюмин С.Л., Боровкова Г.С. Применение анализа конечных изменений и метода обратных вычислений в системах управления и поддержки принятия решений 29

Информационные технологии в управлении

- Сиротюк В.О. Формализованные модели и методы анализа и оценки полноты патентных информационных фондов (на примере международной патентной организации) 35

Управление техническими системами и технологическими процессами

- Шалагинова З.И. Разработка методов количественного обоснования мест расстановки промежуточных узлов управления в крупных системах теплоснабжения 44
- Цодиков Ю.М. Эффективность метода последовательного линейного программирования для задач планирования производства на нефтеперерабатывающем заводе 55

Управление подвижными объектами и навигация

- Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю. Многоконтурное адаптивное управление подвижными объектами при решении траекторных задач 62
- Соколов С.В., Сахарова Л.В., Манин А.А. Стохастическое управление маневром обхода группы подвижных пространственных областей 73

Краткие сообщения

- Чадаев А.И., Тропова Е.И. Повышение безопасности выведения ракеты-носителя «Союз-2» путем прогнозирования выработки топлива на многоблочной I ступени 83

* * *

- Указатель статей, опубликованных в 2018 г. 85
- Index of papers published in 2018 86
- Contents and abstracts 88

МОДЕЛИ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

В.Б. Гусев

Представлен обзор состояния проблемы разработки и применения моделей автономного управления в развивающихся системах. Предложено формализованное описание класса моделей автономного управления развивающимися системами с воспроизводством. Кратко описана концепция сочетания механизмов индикативного планирования и регулирования в условиях технологических и информационных ограничений. Сформулированы проблемные моменты и даны рекомендации для построения систем автономного управления в условиях неустойчивости и внешних возмущений, основанные на примерах индикативного планирования и управления региональным развитием.

Ключевые слова: модель, развивающаяся система, автономное управление, индикативное планирование, регулирование, технологические и информационные ограничения.

ВВЕДЕНИЕ

Развивающиеся системы, такие как социально-экономические, организационные, медико-биологические, экологические и другие, отличаются рядом характерных свойств. С одной стороны, они обладают элементами целенаправленности, возможностями воспроизводства внутренних ресурсов, функционирования в неблагоприятной среде, адаптации к изменяющимся условиям [1–3]. С другой стороны, эти системы могут демонстрировать циклический характер развития, непредсказуемые спады и кризисы или даже хаотические изменения своего состояния [4–6]. Примеры такой динамики дает мировая экономическая система [7].

Проблема автономного управления развивающимися системами особенно актуальна для национальной экономики в ситуации внешнеэкономических санкций, приводящей к локализации производственной деятельности. Аналогичная проблема возникает у регионов освоения ископаемых ресурсов или у моногородов, когда ведущая отрасль постепенно сворачивает свою деятельность [8, 9]. Очевидный путь решения — диверсификация экономики за счет внутренних инвестиций [10]. Функции одной только «невидимой руки рынка» для выхода из критической ситуации в данном случае не достаточно. Для этого требуется разработка и

реализация индикативного плана долгосрочного режима накопления и инвестирования в развитие экономики, сочетаемого с контуром обратной связи [11–14]. Расчет плана должен учитывать специфику и ограничения автономного режима, в частности, оценку технологического потенциала экономической системы (потенциала продуктивности и связанной с ним предельной рентабельности и предельных темпов роста для замкнутой модели экономики [15]). Для реализации автономного режима развития экономической системы с применением методов индикативного планирования требуются механизмы, позволяющие автоматически подстраиваться к текущей ситуации в соответствии с выработанной стратегией [16, 17].

Моделирование процессов социально-экономического развития, как правило, ориентировано на достижение режима стабильного роста. В его задачи входят:

- исследование качественного поведения процессов в развивающейся системе;
- разработка методов и процедур формирования управляющих воздействий и индикативного планирования;
- изучение влияния различных механизмов автономного управления на динамику развития.

При этом учитывается существенное влияние факторов неопределенности, а также различные гипотезы поведения агентов.



Точность математических моделей рассматриваемых систем обычно недостаточна для построения эффективных механизмов управления, применяемых, например, в технических устройствах и системах [18–20]. Это связано с открытостью развивающихся систем, нестабильностью внешней среды, трудностями формализации и информационного обеспечения применяемых моделей.

Неопределенность и дефицит точности наблюдаемых данных находят отражение в специфике применяемых моделей развивающихся систем. С одной стороны, у них, как правило, нет однозначной зависимости показателей состояния среды от расчетных показателей системы (отсутствует свойство наблюдаемости), т. е. конкретный результат функционирования модели может реализовываться при различных значениях состояния среды из некоторого множества, что можно трактовать как предпосылку ее автономного функционирования при соответствующем механизме управления. С другой стороны, совокупность типов разрабатываемых моделей развивающихся систем отличается разнообразием, отражая доступную степень информированности и возможные целевые установки при принятии решений. Эта совокупность включает в себя динамические модели макроэкономических процессов [21–23], имитационные модели микроэкономических процессов [24–26], игровые модели выбора решений [27, 28], экспертные модели оценивания ситуаций [29, 30], автоматные модели самовоспроизводства [31], сетевые модели организационных структур [32, 33], когнитивные модели анализа сценариев и управления [34, 35], нейронные модели реализации и управления проектами [36, 37], вероятностные модели эконометрического анализа данных [38, 39] и др. Особо отметим класс моделей активных систем [40–42], сочетающих стратегическое целеполагание и учет локальных интересов, наиболее близко соответствующий рассматриваемой концепции управления. Этот класс включает в себя преимущественно статические модели.

В настоящей работе рассмотрены возможные формализованные подходы к анализу рассматриваемого класса систем. Обобщением класса моделей управляемых динамических систем служит их метамодель. Дано определение наблюдаемости для рассматриваемых систем, показана ее связь с понятием автономности модели развивающейся системы. Затронуты вопросы реализации и применения моделей целенаправленных систем с автономным управлением, учитывающие многоцелевые постановки задач управления, модели роста, воспроизводства, сбалансированности саморазвития систем, автономного управления с оптимизирующим регулятором. Приведено описание проблемы монопродуктовой экономики и ее решения путем ди-

версификации в рамках методологии автономного управления. Дано краткое описание собственных результатов автора в рамках рассматриваемой тематики.

1. МЕТАМОДЕЛЬ УПРАВЛЯЕМОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Под метамоделью открытой управляемой динамической системы будем понимать совокупность

$$\langle Y, P, U, X, T, \Omega \rangle,$$

где Y — множество значений динамического вектора состояния системы, P — множество значений вектора параметров системы, U — множество значений векторов управления, X — множество значений вектора состояния внешней среды, T — множество значений параметра модельного времени, Ω — оператор действия системы

$$W \xrightarrow{\Omega} Y.$$

Здесь W — множество условий функционирования — прямое произведение множеств X, P, U

$$W = X \otimes P \otimes U.$$

Если множество условий функционирования W не зависит от множества значений вектора состояния внешней среды X ,

$$W = P \otimes U,$$

то совокупность $\langle Y, P, U, X, T, \Omega \rangle$ будем называть метамоделью замкнутой управляемой динамической системы.

Под вектором состояния системы понимается векторная функция времени $y(t) \in Y$, под вектором параметров — числовой вектор $p \in P$, под вектором управлений — векторная функция времени $u(t) \in U$, под вектором состояния внешней среды — векторная функция времени $x(t) \in X, t \in T$.

Множества Y, U, X принадлежат соответствующим нормированным функциональным пространствам; множество P принадлежит многомерному, а множество T — одномерному евклидову пространству.

При фиксированном векторе параметров $\bar{p} \in P$ и векторе состояния внешней среды $\bar{x}(t) \in X$ множество состояний Y сужается до множества $\bar{Y} = Y^{\Omega}(\bar{x}, \bar{p}, U)$, и таким образом модель становится замкнутой.

Если отображение, задаваемое оператором Ω , является однозначным, а вектор состояния внешней среды $x(t)$ и вектор параметров p детерминированы, такую модель будем называть детерминированной. Для детерминированной модели множество

состояний Y однозначно определяется множеством условий функционирования W , т. е.

$$Y = Y^{\Omega}(X, P, U).$$

Примерами *недетерминированной* модели служат модель, включающая в себя стохастический вектор состояния внешней среды $x(t)$ или вектор параметров p , и модель с неоднозначным оператором Ω .

1.1. Дискретная модель динамической системы

Если T — дискретное множество, то модель будем называть *дискретной*.

Если множество T состоит из единственного элемента, то модель будем называть *статичной*.

Множество T может иметь сложную структуру, включая подмножества внутреннего T^I и внешнего T^O времени. В этом случае вектор состояния системы $y(t)$ определен на подмножестве внутреннего времени $t \in T^I$, а вектор состояния внешней среды $x(\tau)$ — на подмножестве внешнего времени $\tau \in T^O$. Синхронизация подмножеств времени может осуществляться с помощью взаимно-однозначного отображения $t = \varphi(\tau)$ [43, 44].

Дискретную модель динамической системы, построенную на основе формализма теории автоматов [31], назовем *автоматной*. В предположении, когда Y — множество значений вектора состояния системы и W — множество условий функционирования совпадают, один такт такого автомата в момент t_i реализуется так:

$$W(t_i) \xrightarrow{\Omega_i} W(t_{i+1}).$$

1.2. Наблюдаемость и автономность модели управляемой динамической системы

Функционирование системы позволяет задавать ее формализованное описание, на основании которого определяется порядок вычислений вектора состояния системы $y(t) \in Y$ при численной реализации оператора действия Ω .

Свойство наблюдаемости оператора Ω на подмножестве допустимых состояний системы $\bar{Y} \subseteq Y$ находится в определенной связи со свойством автономности и может определяться следующим образом. Пусть данному вектору состояния системы y соответствует подмножество состояний внешней среды $X^{\Omega}(y) \subseteq X$,

$$\forall y \in \bar{Y}, \exists X^{\Omega}(y), p \in P, u \in U, \\ \forall x \in X^{\Omega}(y) : y \in Y^{\Omega}(x, p, u).$$

Имеет место Ω -наблюдаемость модели, если множество состояний внешней среды $X^{\Omega}(y)$, соответствующее данному вектору состояния системы y , состоит из одного элемента, что означает однозначную зависимость состояния системы от состояния внешней среды (*наблюдаемость* в классическом понимании). Пусть множество *допустимых* состояний внешней среды $\bar{X} \subseteq X$ включает в себя только те состояния, которые определяют допустимые состояния системы:

$$\bar{X} = X^{\Omega}(\bar{Y}) = \bigcup_{y \in \bar{Y}} X^{\Omega}(y).$$

Если множество $X^{\Omega}(y)$ пусто, а $\bar{X}$ не пусто, это означает, что состояние y нереализуемо (недопустимо). В случае, когда любому элементу множества допустимых состояний системы $\bar{Y} \subseteq Y$ соответствует все множество допустимых состояний внешней среды $\bar{X}$,

$$\forall y \in \bar{Y} : \bar{X} \subseteq X^{\Omega}(y),$$

модель системы *автономна* на допустимом множестве $\bar{Y}$. Например, модель системы автономна, когда множество $\bar{X}$ пусто или состоит из единственного элемента. В последнем случае имеют место одновременно наблюдаемость и автономность. Когда условие автономности нарушается, можно говорить о *частичной автономности* модели системы на допустимом множестве $\bar{Y}$, если найдется собственное подмножество $\bar{\bar{Y}} \subset \bar{Y} \subseteq Y$, на котором выполняется условие автономности. Аналогично можно говорить о частичной автономности на множестве $\bar{X}$, если найдется собственное подмножество $\bar{\bar{X}} \subset \bar{X} \subseteq X$, на котором выполняется условие автономности.

Модель системы, находящейся в полной изоляции от внешней среды, а также когда условие наблюдаемости выполняется на единственной траектории $x(t)$ внешней среды из $\bar{X}$ для любой векторной функции состояния системы $y(t) \in \bar{Y}$, автономна.

2. РЕАЛИЗУЕМОСТЬ МОДЕЛЕЙ ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫХ СИСТЕМ С АВТОНОМНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

2.1. Вычислимый оператор модели динамической системы

Для детерминированной динамической модели оператор Θ_{ε} назовем ε -вычислимым относительно



оператора Ω , если при $t \in \mathbf{T}$ и для заданного $\varepsilon > 0$ имеет место представление

$$\mathbf{y}_\varepsilon(t) = \Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}, (\tau), \mathbf{u}(\tau), t), \quad \tau < t,$$

где правая часть — непрерывная функция своих аргументов и для $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{Y}^\Omega(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{u})$ выполняется неравенство

$$\|\mathbf{y}_\varepsilon(t) - \mathbf{y}(t)\| < \varepsilon.$$

Назовем семейство операторов Ω_ε — ε -вычислимым относительно оператора Ω , если при $t \in \mathbf{T}$ и для любого $\varepsilon > 0$ найдется оператор $\Theta_\varepsilon \in \Omega_\varepsilon$ такой, что выполняется неравенство

$$\|\Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), t) - \mathbf{y}(t)\| < \varepsilon.$$

К операторам такого семейства относятся, например, операторы, представленные задачей Коши для системы обыкновенных дифференциальных и алгебраических уравнений с начальными условиями, включенными в вектор параметров $\mathbf{p}$. Применительно к моделям социально-экономических систем ε -вычислимы операторы в том или ином виде содержат информацию о технологическом уровне экономики, а также о процессах производства и потребления благ [45—47]. Семейства ε -вычисляемых операторов находят применение в значительном числе работ, посвященных расчету прогнозов, анализу перспектив и последствий принимаемых решений, стратегического и индикативного планирования развития социально-экономических систем [48, 49].

2.2. Вычисляемый автоматный оператор

Автоматная модель за n тактов реализует оператор

$$\Omega_a = \Omega_1 \Omega_2 \dots \Omega_n,$$

осуществляющий многократное отражение (рефлексию) состояния системы $\mathbf{w}$ в себя и реализующий вычисляемый автоматный оператор Θ_a :

$$\mathbf{w}(t) = \Theta_a(\mathbf{p}, \mathbf{u}(\tau)), \quad \tau \leq t, \quad \mathbf{p} = \mathbf{w}_0.$$

Пусть оператор такта Ω_i задается с помощью матрицы $\mathbf{A}_i = \mathbf{A}(u(t_i))$, $i = \overline{1, n}$ и операций сложения $\oplus$ и умножения $\otimes$ векторной алгебры (вообще говоря, нелинейной). Процесс вычислений состояния системы на такте i дает результат:

$$\mathbf{w}(t_i) = \bigotimes_{j=1}^i \mathbf{A}_j \otimes \mathbf{w}(t_0),$$

где $\mathbf{w}(t_0) = \mathbf{w}(u(t_0))$. Автоматные модели такого типа широко применяются в процедурах принятия решений на основе экспертных данных [35, 50, 51].

Если операторы Ω_i ограничены, процесс рефлексий может иметь циклический характер или расходиться. Если операторы Ω_i сжимающие, процесс $\mathbf{w}(t_i)$ сходится к состоянию $\bar{\mathbf{w}}$, называемому транзитивным замыканием для исходного состояния $\mathbf{w}(t_0)$.

2.3. Вычисляемое управление

Будем говорить, что управление $\mathbf{u}(t)$ вычисляемое, если его можно представить как результат отображения Ψ тройки векторов $\langle \mathbf{y}, \mathbf{x}, \mathbf{p} \rangle$ на множество $\mathbf{U}$, где функции $\mathbf{x}(\tau)$, $\mathbf{y}(\tau)$ заданы на подмножестве $\mathbf{T}$, предшествующем t , т. е.

$$\mathbf{u}(t) = \Psi(\mathbf{y}(\tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), t), \quad \tau \geq t.$$

Для вычисления вектора управлений $\mathbf{u}(t)$ могут применяться различные средства и подходы, например, датчик случайных чисел, программируемый автомат [31], оптимизационные алгоритмы поиска экстремума для целевого функционала $F(t, \mathbf{y}(\tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau))$; $t, \tau \in \mathbf{T}$ [52]. В последнем случае управление называется одноцелевым, а отображение Ψ вычисляется по схеме:

$$\mathbf{u}(t) = \operatorname{argextr} \bar{F}(\mathbf{u}(\tau)), \quad t, \tau \in \mathbf{T}; \quad t \geq \tau.$$

Для ε -вычисляемого оператора

$$\begin{aligned} \bar{F}(\mathbf{u}(\tau')) &= F(t, \Theta(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau'), \mathbf{u}(\tau'), \tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau)), \\ t, \tau, \tau' &\in \mathbf{T}; \quad t \geq \tau \geq \tau'; \quad \Theta \in \Omega_\varepsilon. \end{aligned}$$

Для автоматного оператора

$$\bar{F}(\mathbf{u}(t)) = F(t, \mathbf{w}(\mathbf{u}(\tau))).$$

Для открытой модели вычисление управления $\mathbf{u}(t)$ требует знания вектора состояния внешней среды на всем множестве времени $\mathbf{T}$, что редко реализуется на практике. Вычисляемое управление в случае, когда известен вектор $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{X}$, $t \in \mathbf{T}$, удовлетворяет уравнению рефлексии, отображающему действие обратной связи по управлению в рассматриваемой системе:

$$\mathbf{u}(t) = \Psi(\Theta(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), t'), \mathbf{p}, \mathbf{x}(t'), t), \quad \tau \leq t' \leq t, \quad \Theta \in \Omega_\varepsilon. \quad (1)$$

Если это уравнение имеет решение, то можно говорить, что такая вычисляемая модель обладает свойством ε -управляемости. В общем случае для отображения Ψ уравнение (1) может не иметь решения. В таком случае можно говорить, что система противоречит свойству ε -управляемости. Уравнение рефлексии можно применять для организации итеративного процесса расчета управления $\mathbf{u}(t)$. Этот процесс может как сходиться, так и расходиться. Компоненты управления могут изме-

няться в процессе итераций монотонно, циклически, хаотически — в зависимости от свойств отображения Ψ .

2.4. Автономное управление

Возможный ответ на неопределенность, присущую моделям развивающихся систем, и нестабильность их поведения заключается в локализации объекта и системы управления, позволяющей уменьшить влияние извне, уменьшить требования к информационному обеспечению, упростить и сделать механизмы управления более эффективными.

Вычислимое управление $u(t)$ является *автономным*, если оно при фиксированном значении вектора параметров системы $p \in P$ определяется только на основании значений $y(\tau)$ состояний системы из *допустимого подмножества* $\bar{Y}$ множества Y , т. е. может быть представлено как результат отображения

$$u(t) = \Psi^a(y(\tau), p, t); \quad \tau \in T, \quad y(\tau) \in \bar{Y} \subseteq Y.$$

Например, вычислимое управление автономно, когда фиксированы вектор параметров p и вектор состояния внешней среды $x(\tau)$, $\tau \in T$, а отображение Ω однозначно. Более общим условием автономного управления служит наличие свойства Ψ -наблюдаемости отображения Ω : для любого состояния $y(\tau) \in \bar{Y}$ и $p \in P$ найдется $x(\tau) \in X$ такое, что

$$\Psi^a(y(\tau), p, t) = \Psi(y(\tau), p, x(\tau), t); \quad t, \tau \in T.$$

Понятие автономного управления может охватывать несколько своих разновидностей.

Управление $u(t)$ называется автономным с *ограниченной предысторией*, если оно зависит от состояний системы на ограниченном отрезке времени, предшествующем текущему моменту, т. е. может быть представлено как результат отображения

$$u(t) = \Psi^a(y(\tau), t); \quad y(\tau) \in \bar{Y} \subseteq Y, \\ \tau \in [t - \varepsilon, t], \quad \varepsilon \geq 0.$$

При $\varepsilon = 0$ такое $u(t)$ называется автономным управлением *без предыстории*.

Модель динамической системы с автономным управлением

$$y(t) = \Theta(p, x, \Psi^a(y, \tau), t), \quad y(\tau) \in \bar{Y} \subseteq Y, \quad \Theta \in \Omega_\varepsilon$$

становится автономной, если вычислимый оператор Θ не зависит от состояния внешней среды x либо при фиксированном значении этого вектора.

Развивающиеся системы с автономным управлением так же, как аналогичные технические сис-

темы, характеризуются ограниченным использованием материальных и информационных ресурсов. Назначение таких систем — в условиях изменяющейся (возможно, дестабилизирующей поведение системы) внешней среды благодаря применению моделей и механизмов управления разумной сложности обеспечить стабильный режим развития с требуемой (позитивной) динамикой, избегая при этом нежелательных режимов функционирования. Последнее обеспечивается внутренними механизмами выбора управляющих воздействий, критериев принятия решений в соответствии с состоянием самой системы и внешней среды [29].

2.5. Режим роста системы

Пусть $H(y)$ — *оператор ресурсов*, зависящий от компонент вектора $y(t) \in Y$ и определяющий показатели, которые интерпретируются как ресурсные. Условие неубывания ресурсов

$$\exists \varepsilon > 0, \quad \forall \delta, \quad 0 < \delta \leq \varepsilon, \quad t,$$

$$(t - \delta) \in T : H(y(t)) \geq H(y(t - \delta))$$

определяет режим *роста*. Подмножество всех состояний $Y^H \subseteq Y$, на котором оно может выполняться, назовем *внутренней областью состояний роста*.

Множество состояний (значений вектора состояния) внешней среды $X^H \subseteq X$, для которого выполняются условия роста, будем называть *внешней областью роста*. Определение области автономного роста с помощью ε -вычислимого оператора Θ_ε представляется условием:

$$\exists \varepsilon > 0, \quad \forall 0 < \varepsilon < E: \exists u(\tau), \delta > 0, \quad X^H(u), \quad x \in X^H(u):$$

$$H(\Theta_\varepsilon(p, x(\tau_1), u(\tau_1), t_1)) \geq H(\Theta_\varepsilon(p, x(\tau_2), u(\tau_2), t_2)),$$

$$\tau_1 < t_1, \quad \tau_2 < t_2, \quad t_2 = t_1 - \delta.$$

Область автономного роста расширяется на объединение областей автономного роста по управлениям $u \in \bar{U}$, удовлетворяющим условию автономного роста:

$$X^H = \bigcup_{u \in \bar{U}} X^H(u).$$

Для выполнимости условия роста (существования соответствующих значений $p, x(t), u(t)$) достаточно, чтобы в области допустимых значений вектора ресурсов $h \in \bar{H}$ и области допустимых состояний системы Y^H выполнялось свойство *H-наблюдаемости* оператора ресурсов:

$$\forall h \in \bar{H}, \quad \exists y \in Y^H : H(y) = h$$



и в области допустимых значений вектора допустимых состояний внешней среды $\mathbf{X}^e$ выполнялось условие ε -наблюдаемости оператора Ω :

$$\forall \mathbf{y} \in \mathbf{Y}^H, \varepsilon > 0, \exists \mathbf{p} \in \mathbf{P}, \mathbf{u} \in \mathbf{U}, \mathbf{X}^e, \\ \forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}^e : |\mathbf{y} - \Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_1), \mathbf{u}(\tau_1), t_1)| \leq \varepsilon.$$

Совокупность этих условий означает $\mathbf{H}_\varepsilon$ -наблюдаемость оператора действия Ω . Область допустимых состояний внешней среды $\mathbf{X}^e$ определяется областью допустимых состояний системы $\mathbf{Y}^H$, которая, в свою очередь, соответствует области допустимых значений вектора ресурсов $\bar{\mathbf{N}}$. Если область допустимых состояний внешней среды $\mathbf{X}^e$ совпадает со всем множеством $\mathbf{X}$, то условие роста выполнимо при любых внешних условиях.

Режим *стабильного роста* определяется условием гарантированного возрастания ресурсов

$$\exists \delta, \delta \geq \tau > 0, k > 1 : \mathbf{H}(\mathbf{y}(t)) \geq k(t, \tau) \cdot \mathbf{H}(\mathbf{y}(t - \tau)),$$

где $k(t, \tau)$ — показатель роста на интервале $[t - \tau, t] \subset \mathbf{T}$.

С помощью вычислимого оператора Θ_ε условие стабильного роста можно представить в виде

$$\exists \varepsilon > 0, \forall 0 < \varepsilon < E : \exists k > 1, \exists \delta > 0 :$$

$$\mathbf{H}(\Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_1), \mathbf{u}(\tau_1), t_1)) \geq k\mathbf{H}(\Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_2), \mathbf{u}(\tau_2), t_2)), \\ \tau_1 < t_1, \quad \tau_2 < t_2, \quad t_2 = t_1 - \tau.$$

Под моделью *саморазвивающейся* системы будем понимать модель динамической (развивающейся) системы воспроизводства с автономным управлением

$$\exists \delta > 0, \forall \tau, \tau \leq \delta : \mathbf{y}(t) = \Theta(\mathbf{p}, \mathbf{x}, \Psi^a(\mathbf{y}, \tau), t),$$

$$\mathbf{y}(\tau) \in \bar{\mathbf{Y}} \subseteq \mathbf{Y}, \Theta \in \Omega_\varepsilon, \mathbf{H}(\mathbf{y}(t)) \geq \mathbf{Z}(\mathbf{y}(t - \tau)).$$

Общее свойство моделей саморазвивающихся систем состоит в строгой вложенности множества состояний внешней среды, для которого выполняются условия воспроизводства (область воспроизводства $\bar{\mathbf{X}} \subset \mathbf{X}$ может составлять часть пространства состояний внешней среды).

2.6. Модели воспроизводства ресурсов системы

Процесс *воспроизводства* может характеризоваться потреблением и выпуском ресурсов, описываемых компонентами вектора состояния системы [45]. Если оператор $\mathbf{H}(\mathbf{y}(t))$ интерпретировать как вектор выпуска, а вектор затрат, имеющий ту же размерность, обозначить как $\mathbf{Z}(\mathbf{y}(t))$, то условие воспроизводства принимает вид:

$$\exists \delta > 0, \quad \forall \tau, \tau \leq \delta : \mathbf{H}(\mathbf{y}(t)) \geq \mathbf{Z}(\mathbf{y}(t - \tau)).$$

Множество состояний (значений вектора состояния) внешней среды $\mathbf{X}^V \subseteq \mathbf{X}$, для которого выполняются условия воспроизводства ресурсов, будем называть *областью воспроизводства*.

Область *автономного воспроизводства* определяется по аналогии с областью автономного роста:

$$\exists E > 0, \forall 0 < \varepsilon < E : \exists u(\tau), \delta > 0, \forall \mathbf{x} \in \mathbf{X}^Z(u):$$

$$\mathbf{H}(\Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_1), \mathbf{u}(\tau_1), t_1)) \geq \mathbf{Z}(\Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_2), \mathbf{u}(\tau_2), t_2)), \\ \tau_1 < t_1, \quad \tau_2 < t_2, \quad t_2 = t_1 - \delta.$$

Под моделью *развивающейся* системы будем понимать модель динамической системы воспроизводства с вычислимым управлением.

Процесс *сбалансированного воспроизводства* системы может характеризоваться динамикой потребления и выпуска ресурсов, описываемых компонентами вектора состояния системы [53]:

$$\exists \tau, \lambda > 1, \quad t_2 = t_1 - \tau, \quad \mathbf{H}(\mathbf{y}(t_1)) \geq \lambda \mathbf{Z}(\mathbf{y}(t_2)).$$

В данном условии величина $\lambda(\mathbf{y}(t)) - 1$ означает долю прироста ресурсов и может интерпретироваться как показатель *продуктивности* системы [54].

Верхняя грань показателя продуктивности $\lambda - 1$ может быть определена путем решения экстремальной задачи

$$\lambda(\mathbf{y}) \rightarrow \sup_{\mathbf{y} \in \mathbf{Y}(\mathbf{x}, \mathbf{p}, \mathbf{U})}$$

при условии

$$\exists \tau, t_2 = t_1 - \tau, \mathbf{H}(\mathbf{y}(t_1)) \geq \lambda \mathbf{Z}(\mathbf{y}(t_2)).$$

Если вектор состояния $\mathbf{y}(t)$ интерпретировать как объемы выпусков продукции, то полученное решение дает их индикативные уровни в режиме сбалансированного воспроизводства [46]. Если вектор состояния $\mathbf{y}(t)$ интерпретировать как цены на продукцию, то решение дает их индикативные уровни [47].

Будем считать, что $\mathbf{p}, \mathbf{x}(\theta), \mathbf{y}(\theta), t_2$ ($\theta \leq t_2$) заданы, а затраты ресурса могут быть представлены как функция управления $\mathbf{Z}(\Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{u}(\tau), t))$. Показатель продуктивности $\lambda - 1$ может быть использован в качестве целевого функционала при вычислении управления $\mathbf{u}(\theta)$ путем решения экстремальной задачи

$$\lambda(\mathbf{u}(\theta)) \rightarrow \sup_{\mathbf{u}}$$

при условии

$$\exists E > 0, \forall 0 < \varepsilon < E : \exists \tau, t_2 = t_1 - \tau, \tau_2 = \tau_1 - \tau, \exists \lambda > 0 :$$

$$\mathbf{H}(\Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_1), \mathbf{u}(\tau_1), t_1)) \geq \lambda \mathbf{Z}(\Theta_\varepsilon(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau_2), \mathbf{u}(\tau_2), t_2)).$$

Экстремум $\bar{\lambda}$ функционала $\lambda(\mathbf{u})$, полученный в результате решения этой задачи, определяет *потенциал продуктивности* экономической системы [54]. Если $\bar{\lambda} > 1$, то процесс воспроизводства потенциально реализуем. Если затраты $\mathbf{Z}$ начинают превышать уровень $\mathbf{H}/\bar{\lambda}$, режим сбалансированного воспроизводства становится *невозможным*. Это можно интерпретировать следующим образом: технологический уровень экономики задает определенный предельный уровень рентабельности $\bar{\lambda}$ для имеющихся видов экономической деятельности, функционирующих в режиме сбалансированного воспроизводства [15]. Кроме того, величина $\bar{\lambda}/\tau$ дает верхнюю оценку темпа роста экономической системы с заданным технологическим уровнем.

Функционирование системы в режиме сбалансированного воспроизводства при наличии автоматных операторов такта Ω_p , задаваемых с помощью матриц влияний $\mathbf{A}_p$, можно трактовать как форму автономного режима функционирования, определяемого только состоянием системы.

2.7. Многоцелевое управление

Целевой функционал $F(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x})$ априори может не иметь явного аналитического или вычислимого представления. Так, если динамика механической системы описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, целевой функционал может быть представлен в виде функционала действия. С другой стороны, при постановке задачи управления могут фигурировать несколько целевых функционалов (критериев) $F_i(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x})$, $i = 1, \dots, k$. Для расчета одноцелевого управления в таком случае можно воспользоваться, вообще говоря, нелинейной операцией свертки Φ [55]:

$$F(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x}) = \Phi(F_1(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x}), \dots, F_k(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x})).$$

При фиксированных $\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau)$ можно обозначить целевые функционалы как целевые функции управления

$$f_i(t, \mathbf{u}) = F_i(t, \Theta(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau'), \mathbf{u}(\tau'), \tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau)).$$

Тогда целевая функция принимает вид:

$$f(t, \mathbf{u}) = \Phi(f_1(t, \mathbf{u}), \dots, f_k(t, \mathbf{u})),$$

и для реализации операции свертки можно воспользоваться:

- аналитическим (линейным или нелинейным) заданием функции свертки $\Phi(f_1, \dots, f_k)$;
- суперпозицией функций свертки малой размерности, которые можно задавать либо таблично

(сверткой двух переменных $\Phi_i(f_{i-1}, f_i)$, применяемой в методе комплексного оценивания [56]), либо аналитически, например,

$$\Phi(f_1, f_2, \dots, f_k) = \Phi_1(f_1, \Phi_2(\dots \Phi_k(f_{k-1}, f_k)));$$

- выделением одной функции в качестве целевой и включением остальных в ограничения

$$\sup_{f_i(t, \mathbf{u}) \leq a_p, i = 1, \dots, k} f_0(t, \mathbf{u});$$

- разделением компонент вектора управления $\mathbf{u}$ на группы $\mathbf{u}_p$, соответствующие целевым функциям $f_i(\mathbf{u})$ и выбором управления с помощью вложенных экстремумов [57]:

$$\sup_{\mathbf{u}_1} f_1(t, \mathbf{u}) \mid \sup_{\mathbf{u}_2} f_2(t, \mathbf{u}) \mid \dots \mid \sup_{\mathbf{u}_k} f_k(t, \mathbf{u})$$

(заметим, что такой метод поиска управления применяется в игровых моделях [58], а также в методах теории активных систем [40—42]; каждая перестановка целевых функций в порядке их следования при решении соответствующей оптимизационной задачи может давать свой вектор управления $\mathbf{u}^j$);

- смешанным сбалансированным решением, полученным из управлений $\mathbf{u}^j$ с весами α_j , таким, что

$$\sum_j \alpha_j f_i(t, \mathbf{u}^j) = \sum_j \alpha_j f_j(t, \mathbf{u}^j), \quad i, j = 1, \dots, k,$$

где веса α_j интерпретируются как частоты применения соответствующего решения (аналог смешанной стратегии в теории игр [59]).

2.8. Прогноз вектора состояния

Когда целевой функционал содержит значения вектора состояния для предстоящих моментов времени, требуется знание *прогноза* вектора состояния $\mathbf{y}(t_p)$, $t_p > t$, где t — текущее время. При расчете прогноза вектора состояния $\mathbf{y}(t_p)$, $t_p > t$, необходимо принимать во внимание наблюдаемые значения вектора параметров $\mathbf{p}$, вектора состояния внешней среды $\mathbf{x}(\tau) \in \mathbf{X}$, $\tau \leq t$ и прогноз последнего $\mathbf{x}(\tau) \in \mathbf{X}$, $t_p \geq \tau \geq t$, а также прогноз вектора управления $\mathbf{u}(\tau)$, $t_p \geq \tau \geq t$. Прогноз вектора состояния внешней среды $\mathbf{x}(\tau)$, $t_p \geq \tau \geq t$, для саморазвивающихся систем может содержать неопределенность. Это делает неопределенным также прогноз управления $\mathbf{u}(\tau)$, $t_p \geq \tau \geq t$ и вектора состояния $\mathbf{y}(t_p)$, $t_p > t$.

При наличии свойства управляемости вектор состояния зависит от управления и наоборот. Таким образом, в процедуре вычисления вектора управлений $\mathbf{u}(\tau) = \Psi(\mathbf{y}(\tau'), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau'), \tau)$ используются



результаты расчета прогноза вектора состояния, получаемого в результате решения уравнения

$$\mathbf{y}(t_p) = \Theta(\mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau), \Psi(\mathbf{y}(\tau'), \mathbf{p}, \mathbf{x}(\tau'), \tau), t_p),$$

$$t_p \geq \tau \geq t \geq \tau' \geq t, \quad \Theta \in \Omega_\varepsilon,$$

которое учитывает рефлекссию между векторами состояния и управления и предполагает, что известен прогноз состояния среды $\mathbf{x}(\tau)$ [60]. Если уравнение прогноза имеет решение (что связано с наличием свойства управляемости модели [61]), оно может быть применено в качестве схемы итеративного процесса уточнения прогноза $\mathbf{y}(t_p)$ для вектора состояния.

Из сказанного следует, что прогноз для целенаправленных саморазвивающихся систем имеет ограниченную точность (неустранимую погрешность, связанную с погрешностью оценки прогноза состояния среды $\mathbf{x}(\tau)$), а вычислимое управление в общем случае приводит к состояниям, не соответствующим экстремуму целевого функционала, и не гарантирует стабильного поведения системы. Проблема заключается в выборе механизмов вычислимого управления, свободных от указанных недостатков. Очевидно, автономное управление не использует прогноза состояния системы, что снижает неопределенность при выборе управления динамической системой, но ухудшает качество управления.

2.9. Автономное оптимизирующее регулирование

Локализация системы управления может проявляться, с одной стороны, в ограничении доступных ресурсов, а с другой — способствовать большей стабильности и предсказуемости поведения системы. Благодаря этому автономные системы управления нашли широкое применение в таких областях, как робототехника, разработка беспилотных устройств, в устройствах искусственного интеллекта, обеспечивая надежное выполнение требуемых функций [62–66].

Степень информированности системы автономного управления об объекте находит отражение в методах моделирования и формирования управляющих воздействий. Минимальная информированность об объекте (модель «черного ящика») предполагает наличие только значений управляющих воздействий и ответной реакции объекта. Более высокий уровень информированности допускает знание зависимости целевого показателя от значений управляющих воздействий. На следующем уровне информированности (характерном, например, для экспертных моделей [35]) могут быть известны структура объекта, а также качественные или полуколичественные зависимости показателей (факторов) объекта [37]. Наиболее информационно обеспеченные модели характеризует наличие

количественных зависимостей для полной структуры факторов [52]. Примером такой модели может служить многоотраслевая модель региона с группой обрабатывающих отраслей, финансовым сектором, потоками экспорта и импорта; механизмами автономного управления промежуточными затратами, инвестициями в основные фонды отраслей а также долей отчислений из регионального фонда на инвестиции [67, 68]. В целенаправленных развивающихся системах применяются механизмы оптимизирующего управления, нацеленного на максимизацию целевой функции, например, валового выпуска [67, 69].

Для того, чтобы система могла воспроизводить условия функционирования при определенном диапазоне изменения состояний внешней среды, механизмы автономного управления требуют соответствующей настройки [70]. Такие механизмы целесообразно исследовать с помощью соответствующих математических моделей процессов и систем [71].

В модели целенаправленной автономной системы применяется целевой функционал

$$\hat{F}(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}) = F(t, \mathbf{y}, \mathbf{p}, \mathbf{x}),$$

где состояние внешней среды $\mathbf{x}(t)$ либо не учитывается, либо считается фиксированным.

Целевой функционал облегчает формализацию описания системы, изучение ее свойств, получение прогнозов. Классическим примером такого подхода в классической механике служит принцип Гамильтона — Остроградского [72], позволяющий свести формализацию поведения механической системы к задаче на экстремум функции Гамильтона.

Задача построения механизмов управления для моделей автономных систем имеет много общего с проблемой регуляторов, отличаясь видом целевой функции. У регуляторов это сигнал рассогласования (отклонения от заданного уровня), значение которого необходимо приблизить к нулю. Для решения этой задачи предназначены ПИД-регуляторы [73, 74]:

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt},$$

где e — сигнал рассогласования или ошибки, u — выходная величина регулятора, K — коэффициент пропорциональности (безразмерный), T_i — постоянная интегрирования (размерность времени) и T_d — постоянная дифференцирования (размерность времени) регулятора.

Применение этих конструкций в механизмах автономного управления [51] требует формирова-

ния новой целевой функции, аналогичной функции рассогласования.

В математическом аппарате автономного управления предусмотрен механизм обратной связи, ориентированный на приближение к экстремуму целевой функции. Ее значение определяется состоянием системы, внешней среды, а также прямо и опосредованно управляющими воздействиями. В отличие от вычислительного алгоритма оптимизации, динамический процесс не дает возможности делать пробные шаги в различных направлениях. Здесь может варьироваться только размер шага в зависимости от изменения целевой функции. При этом размер шага может настраиваться по мере развития управляемого процесса.

Обозначим $f(t, u)$ целевую функцию, максимизируемую по u в каждый текущий момент t . Пусть эта функция — ограниченной вариации по аргументу t , дважды дифференцируемая по аргументам и выпуклая вверх по u (при ее максимизации по этому аргументу).

Оптимальное управление $u(t)$ удовлетворяет необходимому условию

$$\partial f(t, u)/\partial u = 0.$$

Аппроксимируем целевую функцию в окрестности фиксированной точки $\bar{u}$ рядом Тейлора до второго порядка

$$f(t, u) \cong f(t, \bar{u}) + \partial f/\partial u(u - \bar{u}) + \partial^2 f/\partial u^2(u - \bar{u})^2.$$

Необходимое условие оптимальности по u для квадратичного приближения целевой функции в малой окрестности оптимальной точки u примет вид

$$\partial f/\partial u + 2\partial^2 f/\partial u^2(u(t) - \bar{u}(t)) = 0,$$

откуда шаг приближения к оптимальной точке (аналог метода Ньютона) определяется как

$$u - \bar{u} = \frac{\partial f/\partial u}{2\partial^2 f/\partial u^2} \Big|_{t, \bar{u}} = h\partial f/\partial u. \quad (2)$$

Рассогласование e модели роста первого порядка для механизма оптимизирующего ПИД-регулятора определяется в соответствии с правой частью выражения (2). Здесь

$$h = \left(\frac{2\partial^2 f}{\partial u^2} \right)^{-1}.$$

При максимизации целевой функции $h > 0$. Шаг по управлению должен быть совмещен с шагом по времени. Чтобы учесть изменение опти-

мального управления по времени, продифференцируем необходимое условие (2) по t :

$$\partial^2 f/\partial u \partial t + \partial^2 f/\partial u^2 \partial u/\partial t = 0.$$

Откуда изменение оптимального управления $u(t)$ с учетом зависимости целевой функции от времени определяется как

$$\begin{aligned} u(t_i) &= u(t_{i-1}) - \int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{\partial^2 f/\partial u \partial t}{\partial^2 f/\partial u^2} dt \cong \\ &\cong u(t_{i-1}) + h(\partial f/\partial u - \partial^2 f/\partial u \partial t(t_i - t_{i-1})). \end{aligned}$$

Таким образом, рассогласование для механизма оптимизирующего ПИД-регулятора второго порядка

$$e = \partial f/\partial u - \partial^2 f/\partial u \partial t(t_i - t_{i-1}),$$

а выбор управления $u(t_i)$ на следующем шаге осуществляется в зависимости от предыстории процесса, управляемого дискретным набором последовательных шагов (приближений) $u(t_0), \dots, u(t_{i-1})$.

Экспериментальное исследование механизмов автономного управления [16, 17] на моделях динамики организационных систем показало их эффективность: при адекватном подборе параметров оптимизирующих регуляторов траектории процессов сходятся к оптимальным.

3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛЕЙ АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ В РАЗВИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМАХ

Достижение системой экстремума целевого функционала в процессе ее функционирования можно интерпретировать как выход на *равновесный* (*сбалансированный*) режим, а процесс достижения — как переходный процесс. Состояние равновесия может иметь несколько различных интерпретаций. Это: игровое равновесие взаимодействующих сторон [58]; динамическое равновесие системы, находящейся под влиянием разнонаправленных воздействий; достижение экстремума соответствующего функционала благодаря перераспределению ресурсов системы. Именно последняя интерпретация имеется здесь в виду.

3.1. Балансировка структуры экономики в долгосрочном плане

Рассмотрен подход, основанный на идее балансировки воспроизводства структурных компонентов автономной экономической системы в долгосрочном плане [47]. Объектами балансировки служат пропорции ресурсопотребления в стоимостном и натуральном выражении. Предполагается, что заданы $\mathbf{Z}$ — затраты, $\mathbf{V}$ — выпуски продукции и ус-

луг. На основе этих данных вычисляются a_{ij} — коэффициенты удельных затрат $a_{ij} = Z_{ij}/V_j$.

Сбалансированность пропорций ресурсопотребления трактуется как соответствие задаче оптимизации структуры выпусков по критерию максимума коэффициента роста:

$$\max_{V_i} v, \\ V_i(t) \geq v \sum_{j=1}^n a_{ij} V_j(t),$$

где v — коэффициент роста.

Если иметь в виду, что коэффициенты удельных затрат измеряются на предыдущем этапе цикла в соответствии с изменением цен p_i ,

$$a_{ij}^c = Z_{ij} p_i / (V_j p_j) = a_{ij} p_i / p_j,$$

то задачу балансировки ценовых пропорций в неравновесном режиме можно представить в виде

$$\max_{P_i} v^c, \\ P_i(t) \geq v^c \sum_{j=1}^n a_{ji}^c P_j(t), \\ k_i \geq P_i(t) \geq 1, \quad i = 1, \dots, n,$$

где $P_i(t)$ — индекс цены на благо i .

Продуктивность экономической системы определим как $\pi = Y/Z \cdot 100\%$, где Z — промежуточные затраты, Y — добавленная стоимость. Обозначим материалоемкость $m = Z/X$, валовой выпуск $X = Y + Z$. Тогда $\pi = (1/m - 1) \cdot 100\%$.

В результате решения задачи балансировки получаем оптимальное значение коэффициента роста v^* . Потенциал продуктивности экономической системы $\pi^0 = (v^* - 1) \cdot 100\%$ представляет собой максимум доли добавленной стоимости в стоимости промежуточного потребления, достигаемый при неизменной технологии производственной сферы и равновесном режиме экономической системы.

Поскольку равновесные пропорции цен могут значительно отличаться от существующих, будем решать серию задач оптимизации при возрастающем ряде значений k ($k = 1, \dots, 5$), т. е. в ограничении допускается не более, чем 50%-е изменение пропорций в сторону роста. Для данных по многоотраслевой экономике РФ были получены кривые индикативной динамики индексов цен, приводящие через определенное число шагов к сбалансированной структуре цен (рис. 1).

Индикативная динамика показателя продуктивности $\pi = (v - 1) \cdot 100\%$ представлена на рис. 2.

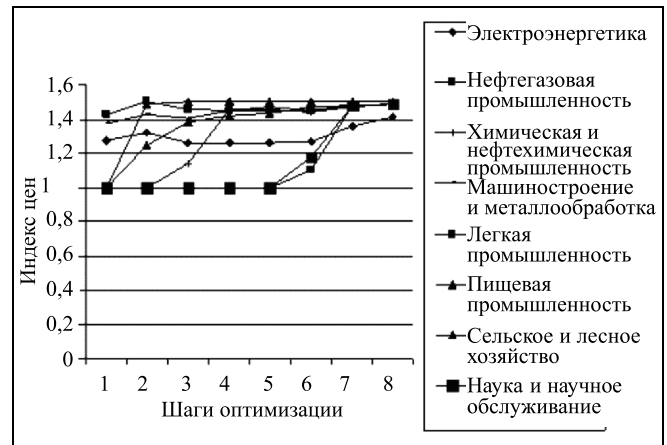


Рис. 1. Индикативная динамика индексов цен с границей шага изменения 0,5

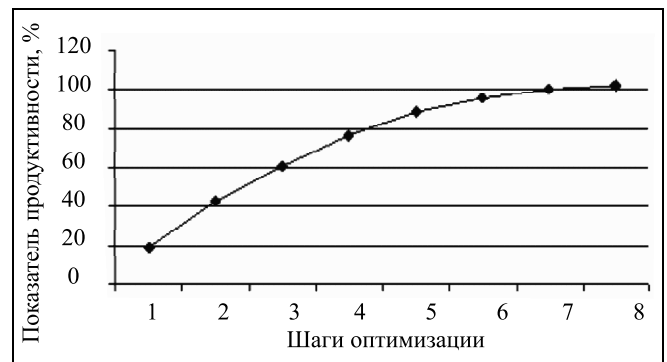


Рис. 2. Индикативная динамика показателя продуктивности

Как видно из рис. 1 и 2, чем ближе структура цен к сбалансированной, тем меньшее влияние оказывают изменения цен на показатель роста.

Для определения границ диапазона бескризисного функционирования экономической системы использовались показатели толерантности экономической системы к вариациям отраслевых показателей (предельные приращения), означающие относительное приращение отраслевого показателя в процентах при неизменности остальных, дающее 1 % приращения потенциала продуктивности. Если толерантность (нечувствительность) к изменению цен определить как $Mp_i = dp_i/dv$, то для сбалансированной структуры цен p_i^* имеем $Mp_i \leq Mp_i^*$. Аналогичное соотношение справедливо для показателя толерантности к изменению выпусков $MV_i = dV_i/dv$.

При приближении саморазвивающейся системы к равновесному состоянию все ее компоненты получают сбалансированную нагрузку, а удаление от состояния равновесия связано с диспропорци-

ями, неравномерной нагрузкой отдельных ее подсистем. Потенциальная способность многопродуктовой экономической системы к саморазвитию определяется фундаментальным свойством технологических взаимосвязей. Реальная же способность к саморазвитию определяется к тому же степенью освоения этих технологий, сбалансированностью системы [46].

Потенциал продуктивности экономической системы по статистическим данным определен на уровне $\pi^0 = 29,6\%$, текущая продуктивность — на уровне $\pi = 10,7\%$. Относительное значение показателя продуктивности экономической системы $u = \pi/\pi_0$ определено на уровне $u = 0,36$. Для определения системной зависимости продуктивности экономики от отраслевых показателей использовался квазиравновесный режим (равновесный с учетом дополнительных ограничений) после адаптации модели к уровню текущей продуктивности. В качестве примера выбран режим, выводящий экономику на уровень продуктивности $\pi = 16\%$

($u = 0,47$), для которого рассчитаны индикативные приросты цен и выпусков.

В таблице приведены предельные приращения выпусков MV_i отраслей, значения предельных приращений цен Mr_i на продукцию отрасли, значения индикативных приростов цен и выпусков.

Курсивом здесь выделены отрасли, для которых экономическая система имеет наименьшую толерантность (наибольшую чувствительность) по отношению к приращению выпусков. Эти отрасли дают наибольший вклад в продуктивность экономической системы при увеличении объемов их выпусков, инвестировании, внедрении инноваций.

Толерантности в этой таблице отрицательны, поскольку приращение цен на отдельные виды продукции вызывает уменьшение потенциала продуктивности. Повышение ценовой рентабельности этих отраслей наиболее критично сказывается на падении продуктивности экономической системы.

Приведенные квазиравновесные показатели представляют собой индикативные (предпочти-

Предельные приращения выпусков (толерантность по выпускам и по ценам продукции) отраслей, индикативные значения приростов цен или выпусков продукции отраслей

Отрасль	Толерантность по выпускам, %	Толерантность по ценам, %	Прирост выпуска, %	Прирост цены, %
Электроэнергетика	22	–185	28	19
Нефтегазовая промышленность	22	–73	0	28
Угольная промышленность	115	–520	0	0
Прочая топливная промышленность	8434	–226 728	0	0
Черная металлургия	34	–100	0	23
Цветная металлургия	44	–90	0	30
<i>Химическая и нефтехимическая промышленность</i>	17	–49	9	25
<i>Машиностроение и металлообработка</i>	9	–32	96	26
Лесная, деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность	38	–129	0	0
Промышленность строительных материалов (включая стекольную и фарфоро-фаянсовую)	82	–517	0	0
<i>Легкая промышленность</i>	9	–17	354	0
<i>Пищевая промышленность</i>	8	–24	107	27
Прочие отрасли промышленности	60	–758	0	0
Строительство	46	–6101	0	19
<i>Сельское и лесное хозяйство</i>	12	–48	63	22
<i>Транспорт и связь</i>	11	–207	62	26
<i>Торговля, посредническая деятельность и общественное питание</i>	10	–132	93	23
Прочие виды деятельности по производству товаров и услуг	110	–2923	0	0
Здравоохранение, физическая культура и социальное обеспечение, образование, культура	22	–692	0	24
Жилищно-коммунальное хозяйство и непроизводственные виды бытового обслуживания населения	39	–3902	0	25
Финансы, кредит, страхование, управление, общественные объединения	67	–236	0	2
Наука и научное обслуживание, геология и разведка недр, геодезическая и гидрометеорологическая	46	–1310	0	24
<i>Конечное потребление домашних хозяйств</i>	3	–33 828 052	660	22



тельные) пропорции выпусков и цен продукции отраслей экономики, направленные на приближение к равновесному режиму и рассматриваемые в системной совокупности либо по вектору прироста цен, либо по вектору прироста выпусков.

3.2. Динамическая многоотраслевая модель диверсификации экономики ресурсодобывающего региона

Модели автономного управления эффективны в системах региональной экономики. Сочетание свойств гибкости и управляемости в определенной степени реализуется в методах индикативного планирования, успешно применявшихся и применяемых различными странами для управления региональной экономикой [8—10, 13, 14]. Регионы, обладавая автономностью в части управления местным хозяйством, должны решать задачи стратегического планирования и управления с опорой на доступные им ресурсы. Особенно актуальна проблема диверсификации экономики монопродуктового региона. Потребности долгосрочного развития (сбалансированного воспроизводства) экономики с преобладанием сырьевого компонента вызвали необходимость разработки и исследования динамических моделей, описывающих переходные процессы, связанные с наработкой технологического потенциала для диверсификации хозяйственной деятельности, перехода на иные сферы производства помимо добычи природных ресурсов [51, 67].

В качестве примера достаточных условий стабилизации рассматривается динамическая многопродуктовая модель диверсификации автономно (без дотаций) функционирующей экономики региона, учитывающая эффект исчерпания на определенном этапе товарного запаса ресурсов. Модель включает в себя автономные механизмы управления, обеспечивающие жизнедеятельность региона после прекращения деятельности ресурсодобывающей отрасли.

Сценарий, который воспроизводится путем моделирования, состоит в ограниченном по времени функционировании сырьевой отрасли, сопровождающимся развитием сопутствующих отраслей, а также развитием хозяйственного взаимодействия с соседними регионами. Управление сценарием осуществляется с помощью автономных механизмов, которые можно интерпретировать как набор индикативных правил или норм, предписанных участникам хозяйственной деятельности рассматриваемого региона. Эти правила сформированы как на основе анализа известных методов автономного управления динамическими объектами, так и на основе логического анализа результатов моделирования экономических процессов.

Разработанная многопродуктовая модель региона, помимо сырьевой и инновационной отрас-

лей, включает в себя также финансовый сектор. Имитируется локализованный по времени спад в доходах от реализации продукции сырьевой отрасли. Рассмотрим возможные механизмы регулирования экономики в процессе диверсификации. Приведем часть соотношений модели, содержащих управляющие факторы.

Объемы располагаемой (выпускаемой и импортируемой) продукции определяются в соответствии с производственной функцией Леонтьева

$$v_i = \max(0, \min_j (i_j/a_{ji})) + im_i.$$

Накопление пропорционально располагаемой сумме финансов отрасли m_i с регулируемой долей накопления x :

$$nk_i = \max(0, xm_i).$$

Объем финансовых накоплений отрасли m_i определяется притоком средств от чистого экспорта $ex_i - im_i$, расходами на накопления и инфляционными издержками:

$$\frac{d}{dt} m_i = ex_i - im_i - nk_i - m_i k m,$$

где im_i и ex_i — объем импорта и экспорта в i -й отрасли.

Объем финансовых накоплений m представляет собой сумму финансовых накоплений отраслей:

$$\frac{d}{dt} m = \sum_i \frac{d}{dt} m_i.$$

Импорт определяется объемом финансовых накоплений, регулируемой долей импорта и индикаторами затрат в соответствии с системой уравнений:

$$\sum_i im_i = m \cdot im,$$

где im — доля импорта,

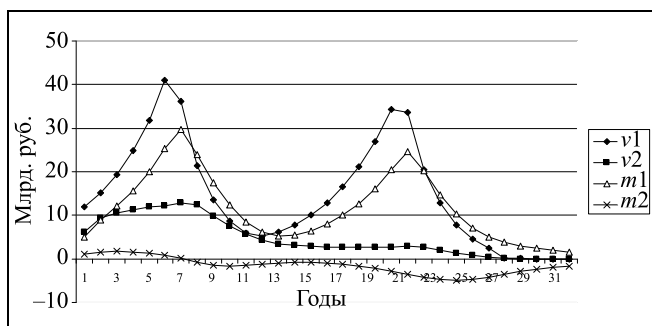
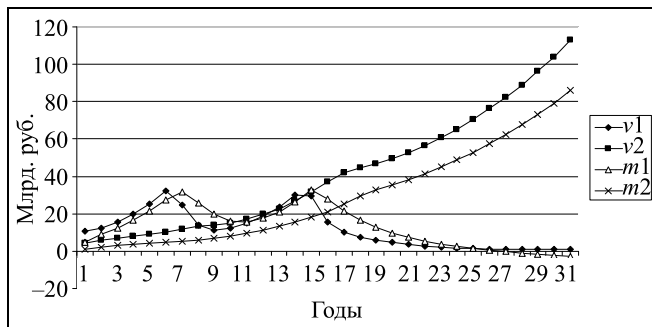
$$im_i/zf_i = im_{i+1}/zf_{i+1}, i = 1, \dots, N-1.$$

zf_i — индикатор затрат продукции i , определяемый как верхняя оценка затрат продукции

$$zf_i = \sum_j a_{ij} f_j,$$

a_{ij} — коэффициент удельных промежуточных затрат продукции i при производстве продукции j ; f_i — основные фонды отрасли i .

Этот автономный механизм управления импортом подобран и опробован в процессе экспериментов на модели с целью обеспечить возможность и устойчивость режима роста.


 Рис. 3. Выпуски продукции и объемы финансов при $im = 0,8$

 Рис. 4. Выпуски продукции и объемы финансов в режиме роста, $im = 0,2$

Оптимизирующая обратная связь нацелена на максимизацию валового выпуска $v = \sum_i v_i$.

Доля накопления определяется с помощью механизма пропорционально-интегрального оптимизирующего регулятора вида

$$\frac{d}{dt}x = kx((v(t) - v(t-1))/(x(t) - x(t-1)) + x(0) - x(t)).$$

Доля импорта определяется аналогично:

$$\frac{d}{dt}im = kim(v(t) - v(t-1))/(im(t) - im(t-1)),$$

где kx и kim — коэффициенты усиления, подбираемые экспериментально.

Включение в модель оптимизирующих регуляторов позволяет расширить диапазон параметров модели, для которого осуществляется режим роста.

Численные расчеты проводились с использованием условных параметров экономики региона. Подбором исходных констант модели удалось получить интерпретируемые режимы динамики системы — роста и спада. Режим роста осуществляется только при определенном диапазоне изменения доли импорта im . При подключении оптимизирующей обратной связи диапазон роста увеличива-

ется, исключая H_ϵ -наблюдаемость системы, что обеспечивает автономное развитие экономики региона.

Режим спада, полученный при начальном уровне доли импорта $im = 0,8$, отображен на рис. 3.

В этом режиме избыточный импорт приводит к необходимости переброски значительных денежных средств на закупку продукции перерабатывающей отрасли и делает финансовые накопления недостаточными для фондообразования. В режиме спада нет возможности перераспределять финансовые средства отраслей, на развитие обрабатывающей отрасли не выделяется достаточное количество средств. В этом режиме внешнеторговая деятельность региона постепенно прекращается после остановки добычи сырья.

Режим роста, полученный при начальном уровне доли импорта $im = 0,2$, отображен на рис. 4. Видно, что финансирование поставок сырья после истощения собственных запасов происходит благодаря обрабатывающей отрасли, т. е. из общего фонда.

Набор мер оздоровления экономики в условиях неблагоприятных внешних воздействий обеспечивает самодостаточность экономики путем ее диверсификации и снижения зависимости от внешних факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиальная недостижимость точного прогноза динамики открытых развивающихся систем, показанная выше, хорошо демонстрируется макроэкономическими моделями, принятыми в курсе «Экономикс» [75], описывающими наблюдаемую динамику, но не способными предсказать грядущие кризисные явления. Развивающиеся системы могут иметь разную степень автономности, зависящую от объема и характера связей с внешним миром. Локализация системы управления развивающейся системы уменьшает наблюдаемость и степень зависимости расчетного прогноза от внешних условий, снижает объем используемых ресурсов и эффективность управляющих воздействий в ответ на внешние возмущения, что может привести к регулярным и нерегулярным осцилляциям и потребовать привлечения дополнительных механизмов в систему управления.

По временным масштабам оказываемого эффекта механизмы автономного управления могут быть отнесены к краткосрочным или долгосрочным. Так, субъективные решения участников хозяйственной деятельности чаще носят краткосрочный характер [76], что может находиться в противоречии с долгосрочными интересами участников. В долгосрочном плане большое значение имеют механизмы, контролирующие показатели роста и



устойчивости процессов воспроизводства и развития [53, 54, 77].

Определение, исследование, применение целевого функционала представляется важным этапом при формировании механизмов управления саморазвивающейся системы. Определение такого функционала (или набора функционалов) для реальной системы начинается с ее экспертного анализа. На этом этапе может быть сформирована экспертная оценка функционала, отражающего целевые устремления системы — в виде формализованной схемы оценивания (целенаправленной свертки оценок отдельных компонент в соответствующих шкалах оценивания) [78].

Одна из центральных задач анализа механизмов автономного управления состоит в определении условий их применимости в соответствии с предъявляемыми требованиями и критериями. Построение механизмов обратной связи на основе целевых показателей в контуре управления, порождающих сходящийся итерационный процесс, служит конструктивным приемом в управленческой практике [79, 80]. Автономное управление в развивающихся системах может приводить к состояниям, не совпадающим с целевыми. В случае, когда поведение системы становится неудовлетворительным (нежелательные спады, осцилляции и др.), необходимо менять существующий алгоритм автономного управления, в том числе подключая механизмы внешнего управления. Такие подключения требуют дополнительных затрат ресурсов и могут носить временный характер [81].

При определенных ситуациях, например, когда состояние внешней среды $x(t)$ претерпевает значительные изменения, может потребоваться перестройка системы управления, обуславливаемая условиями выживания и стабильности. Автономная целенаправленная система в этой ситуации должна допускать возможность изменения целевого функционала или даже применяемой модели объекта в соответствии с изменением этого состояния. Выбор модели определяется свойствами доступных данных об объекте. Если данные носят преимущественно качественный характер, применяются экспертные модели [82—86].

Применение моделей развивающихся систем с автономным управлением служит эффективным инструментом стратегического планирования и управления. Такие модели предназначены для решения конкретных задач — например, формирования план-прогноза ВРП и других макроэкономических показателей развития [45, 87], индикативного планирования развития региона [11—14] и др. Динамическая многоотраслевая модель экономической системы с сырьевой направленностью учитывает эффект исчерпания запаса ресурсов, а также неблагоприятное воздействие окружающей среды

[8—10, 88]. Наличие в моделях внутреннего контура оптимизирующего регулирования обеспечивает в долгосрочном плане выход на динамику роста.

В рамках рассматриваемой тематики автору принадлежит ряд результатов.

- Разработана и исследована замкнутая динамическая модель многоотраслевой национальной экономики, с помощью которой выявлен эффект предельной рентабельности отраслей, превышение которой приводит к отрицательной динамике [15].
- Разработан метод расчета сбалансированных цен и объемов выпуска отраслей, соответствующих максимальной (потенциальной) продуктивности экономической системы [46, 47].
- Исследованы механизмы оптимизирующего регулятора применительно к различным моделям развивающихся систем [16, 17].
- Разработаны динамические модели диверсификации монопродуктовой экономики с выходом на режим роста. Проведена адаптация модели к региону интенсивного освоения недр в условиях экологических ограничений [8—10].
- Разработаны процедуры анализа и выбора оптимальных вариантов на иерархических графах с непрерывными шкалами оценивания [51, 55, 78].
- Разработаны процедуры расчета транзитивного замыкания оценок, предназначенные для экспертного анализа связей в многофакторных системах с применением операций линейной алгебры и многозначной логики. Области применения этих процедур: расчет полных оценок взаимного влияния факторов, оценок системных рисков, полных затрат временных и материальных ресурсов. Проведены сравнительные расчеты оценок долгосрочного эффекта управляющих воздействий для финансово-кредитной системы и реального сектора экономики в условиях глобализации и локализации хозяйственной деятельности [82—86].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Leontief W.* (in collaboration with A. Carter and P. Petri) *The Future of the World Economy.* — N.-Y.: Oxford University Press, 1977.
2. *Вишневский А.Г.* Воспроизводство населения и общество: История, современность, взгляд в будущее — М: Финансы и статистика, 1982. — 287 с.
3. *Разумовский С.М.* Закономерности динамики биогеоценозов — М.: Наука, 1981. — 231 с.
4. *Bambi M., Gozzi F., Licandro O.* Endogenous growth and wave-like business fluctuations // *Journal of Economic Theory.* — 2014. — Vol. 154, N 11. — P. 68—111.
5. *Asea P.K., Zak P.J.* Time-to-build and cycles // *Journal of Economic Dynamics & Control.* — 1999. — Vol. 23, iss. 8. — P. 1155—1175.
6. *Lin H.C.* Computing Transitional Cycles for a Deterministic Time-to-Build Growth Model // *Computational Economics.* —

2018. — Vol. 51, iss. 3. — P. 677–696. — DOI: 10.1007/s10614-016-9633-9.
7. *Mesarovic M., Pestel E.* Mankind at the Turning Point: Second Report to the Club of Rome. — N.-Y.: Dutton, 1974.
8. *Васильев С.Н., Пащенко Ф.Ф., Гусев В.Б.* Моделирование динамики развития региона с сырьевой специализацией // Проблемный анализ и государственно-управленческое проектирование. — 2012. — № 5. — С. 52–62.
9. *Гусев В.Б.* Индикаторы стабильного развития крупномасштабной экономической системы в условиях диверсификации реального сектора // Тр. восьмой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2015» в 2 т. / ИПУ РАН. — М., 2015. — Т. 1. — С. 27–36.
10. *Гусев В.Б.* Модель диверсификации производства для региона интенсивного освоения недр // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2012. — Т. XV, № 3 (51). — С. 24–36.
11. *Гусев В.Б., Ефременко В.Ф., Левинталь А.Б. и др.* Методы индикативного планирования в региональном управлении. — М.: Научная книга, 2006. — 144 с.
12. *Левинталь А.Б., Ефременко В.Ф., Гусев В.Б., Пащенко Ф.Ф.* Расчет показателей индикативного планирования для программ развития региона. — М.: ИПУ РАН, 2006. — 54 с.
13. *Гусев В.Б., Ефременко В.Ф., Левинталь А.Б. и др.* Индикативное планирование и проведение региональной политики. — М.: Финансы и статистика, 2007. — 368 с.
14. *Белкин В.Д., Стороженко В.П.* Индикативное планирование и наращивание инвестиций — необходимые предпосылки повышения темпов роста // Экономическая наука современной России. — 2002. — № 4. — С. 44–56.
15. *Бурков В.Н., Гусев В.Б., Черкашин А.М.* Финансовая продуктивность монополизированных экономик // Приборы и системы управления. — 1994. — № 11.
16. *Гусев В.Б.* Модели автономного управления системами с индикативным целеполаганием // Тр. четвертой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2010), 4–6 окт. 2010 г., ИПУ РАН, Москва, Россия. — М., 2010. — Т. 1. С. 294–296.
17. *Gusev V.B.* Models of Autonomous Control in the Organizational Systems // Proc. of the 2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC) 23–25 May 2011, Mianzhou Hotel. — Mianyang, China. Mianyang, China: Northeastern University. — P. 283–288.
18. *Murillo M.H., Limache A.C., Rojas P.S.F., and Giovanini L.L.* Generalized nonlinear optimal predictive control using iterative state-space trajectories: applications to autonomous flight of UAVs // Int. Journal of Control, Automation, and Systems. — 2015. — Vol. 13, N 2. — P. 361–370.
19. *Li X.F., Chu Y.D., and Andrew Y.T.* Synchronization of uncertain chaotic systems via complete-adaptive-impulsive controls // Chaos Solitons & Fractals. — July 2017. — Vol. 100. — P. 24–30.
20. *Yao D., Lu R., Xu Y., et al.* Adaptive sliding mode control of switched systems with different input matrix // Int. Journal of Control, Automation and Systems. — 2017. — Vol. 15, iss. 6. — P. 2500–2506. — URL: <https://doi.org/10.1007/s12555-016-0570-0> (дата обращения 12.09.2018).
21. *Леонидов А.В., Серебрянникова Е.Е.* Динамическая модель несовершенной конкуренции в многосекторной экономике // Проблемы управления. — 2017. — № 4. — С. 8–16.
22. *Сидоров А.А.* Методологический подход к интегральной оценке состояния и динамики многомерных объектов социально-экономической природы // Проблемы управления. — 2016. — № 3. — С. 32–40.
23. *Афанасьев В.Н.* Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами. — М.: URSS, 2015. — 224 с.
24. *Гусев В.Б., Исаева Н.А.* Оценка синергетического эффекта деятельности предприятий по динамике нематериальных активов // Материалы 10-й междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2017, Москва, ИПУ РАН. — 2017. — Т. 1. — С. 263–265.
25. *Белов М.В.* Математическое моделирование жизненных циклов сложных социально-экономических и бизнес-систем // Проблемы управления. — 2016 — № 2. — С. 49–61.
26. *Горбанева О.И., Угольников Г.А.* Учет коррупции в моделях сочетания общественных и частных интересов в иерархических системах управления // Проблемы управления. — 2016. — № 2. — С. 26–71.
27. *Подinovский В.В.* Согласительные решения многокритериальных задач выбора // Проблемы управления. — 2017. — № 2. — С. 17–26.
28. *Стенников В.А., Пеньковский А.В., Хамисов О.В.* Поиск равновесия Курно на рынке тепловой энергии в условиях конкурентного поведения источников тепла // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 2–9.
29. *Сидельников Ю.В.* Формирование понятийно-терминологического аппарата экспертологии // Проблемы управления. — 2017. — № 5. — С. 18–30.
30. *Пайсон Д.Б.* Матричное моделирование взаимодействия участников цепочек создания ценности в задачах управления структурными преобразованиями ракетно-космической промышленности // Проблемы управления. — 2016. — № 6. — С. 26–34.
31. *Нейман Дж.* Теория самовоспроизводящихся автоматов. — М.: Мир, 1971.
32. *Еналеев А.К.* Согласованные разбиения в сетевых организационных структурах // Проблемы управления. — 2016. — № 6. — С. 18–25.
33. *Ратнер С.В.* Применение сетевого анализа среды функционирования в задачах регионального экологического менеджмента // Проблемы управления. — 2016. — № 6. — С. 35–46.
34. *Кулинич А.А.* Семиотические когнитивные карты. Ч. 1. Когнитивный и семиотический подходы в информатике и управлении // Проблемы управления. — 2016. — № 1. — С. 2–10; Ч. 2. Основные определения и алгоритмы. — № 2. — С. 24–40.
35. *Модели и методы анализа и синтеза сценариев развития социально-экономических систем: в 2-х кн. / под ред. В.Л. Шульца, В.В. Кульбы.* — М.: Наука, 2012.
36. *Асанов А.З., Мышкина И.Ю.* Исследование возможности применения нейронных сетей при решении задачи отбора команды для реализации проекта // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 19–30.
37. *Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления:* учеб. / под ред. Н.Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 744 с.
38. *Гребенюк Е.А., Малинкина А.В.* Сравнение методов эконометрического анализа данных для идентификации финансовых пузырей // Проблемы управления. — 2017. — № 4. — С. 17–25.
39. *Добровидов А.В., Тевосян В.Э.* Непараметрическая оценка волатильности и ее параметрические аналоги // Проблемы управления. — 2017. — № 4. — С. 26–36.
40. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. — М.: Наука, 1977. — 256 с.
41. *Бурков В.Н., Кондратьев В.В., Цыганов В.В., Черкашин А.М.* Теория активных систем и совершенствование хозяйственного механизма. — М.: Наука, 1984. — 272 с.
42. *Белов М.В., Новиков Д.А.* Сетевые активные системы: модели планирования и стимулирования // Проблемы управления. — 2018. — № 1. — С. 47–57.
43. *Гусев В.Б.* Фактор времени в моделях целеполагания // Материалы междунар. научно-практ. конф. «Теория активных систем (ТАС-2014)», Москва, ИПУ РАН, 2014. — С. 71–74.
44. *Ватанабэ С, Икэда Н.* Стохастические дифференциальные уравнения и диффузионные процессы: пер. с англ. под ред. А.Н. Ширяева. — М.: Наука, 1986. — 448 с.
45. *Антипов В.И., Пащенко Ф.Ф.* Модель воспроизводства ВВП России Р1-4К. Материальный аспект. — М.: ИПУ РАН, 2009. — 90 с.
46. *Гусев В.Б.* Равновесные модели многоресурсных саморазвивающихся систем // Проблемы управления. — 2007. — № 3. — С. 18–25.



47. Гусев В.Б. Ценовые индикаторы в модели технологического равновесия // Тр. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем», Москва, ИПУ РАН, 2008. — С. 158—164.
48. Акаев А.А. Проекты и риски будущего: Концепции, модели, инструменты, прогнозы / отв. ред. А.А. Акаев, А.В. Коротаев, Г.Г. Малинецкий, С.Ю. Малков. — М.: КРАСАНД, 2011. — 432 с.
49. Гусев В.Б., Косьяненко А.В. Оценка влияния государственного заказа на воспроизводство ВВП // Проблемы управления. — 2009. — № 1. — С. 36—42.
50. Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. — 2010. — № 3. — С. 2—16.
51. Гусев В.Б. Модели систем с автономным управлением. — М.: ИПУ РАН, 2014. — 284 с.
52. Егоров А.И. Основы теории управления. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 504 с.
53. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сулакишин С.С. Применение вычислимых моделей в государственном управлении. — М.: Научный эксперт, 2007. — 304 с.
54. Гусев В.Б. Продуктивность и устойчивость моделей воспроизводства. — Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2011. — 113 с.
55. Гусев В.Б., Павельев В.В. Использование непрерывных шкал при оценивании и принятии решений в сложных проблемных ситуациях. — М.: ИПУ РАН, 2013. — 118 с.
56. Готов В.А., Павельев В.В. Векторная стратификация. — М.: Наука, 1984.
57. Миллер Дж. Правила инвестирования Уоррена Баффетта. — М.: Альпина Паблишер, 2017. — 374 р.
58. Нейман Дж., Моргенштерн О. Теория игр и экономическое поведение. — М.: Наука, 1970.
59. Гермейер Ю.Б. Игры с противоположными интересами. — М.: Наука, 1976. — 326 с.
60. Белоусов Д.Р., Солнцев О.Г., Хромов М.Ю. Построение долгосрочного научно-технологического прогноза для России методом Форсайт // Проблемы прогнозирования. — 2008. — № 1. — С. 18—32.
61. Воронов А.А. Устойчивость, управляемость, наблюдаемость. — М.: Наука, 1979. — 336 с.
62. Goldberg B., Zufferey R., Doshi N., et al. Power and Control Autonomy for High-Speed Locomotion With an Insect-Scale Legged Robot // IEEE Robotics and Automation Letters. — 2018. — Vol. 3, iss. 2. — P. 987—993.
63. Sardarmehni T., Heydari A. Sub-optimal scheduling in switched systems with continuous-time dynamics: A gradient descent approach // Neurocomputing. — 2018. — Vol. 285. — P. 10—22.
64. Arunkumar G.K., Sabnis A., Vachhani L. Robust Steering Control for Autonomous Homing and its Application in Visual Homing under Practical Conditions // Journal of Intelligent & Robotic Systems. — 2018. — Vol. 89, iss. 3-4. — P. 403—419. — DOI: <https://doi.org/10.1007/s1084>.
65. Zhai D.-H., Xia Y. Adaptive Control of Semi-Autonomous Teleoperation System With Asymmetric Time-Varying Delays and Input Uncertainties // IEEE Trans. on Cybernetics — 2017. — Vol. 47, iss. 11. — P. 3621—3633.
66. Zachariah S.K., Kurian T. Hybrid-state driven autonomous control for planar bipedal locomotion over randomly sloped non-uniform stairs // Robotics and Autonomous Systems. — 2017. — Vol. 97. — P. 18—39.
67. Гусев В.Б. Многопродуктовая модель ресурсодобывающего региона с автономными механизмами управления // Тр. четвертой междунар. конф. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2010), 4—6 окт. 2010 г., ИПУ РАН, Москва, Россия. — М., 2010. — Т. II. — С. 233—239.
68. Ивантер В.В. Прикладное прогнозирование национальной экономики: учеб. пособие / под ред. В.В. Ивантера, Н.И. Буданова, А.Г. Коровкина, В.С. Сутягина. — М.: Экономист, 2007. — 218 с.
69. Гусев В.Б. Согласование критериев принятия решений при целевом планировании // Сибирский журнал индустриальной математики. — 2005. — Т. VIII, № 2 (22) — С. 32—45.
70. Ротач В.Я. К расчету оптимальных параметров реальных ПИД-регуляторов по экспертным критериям // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2006. — № 2. — С. 22—29.
71. Емельянов А.А., Власова Е.А., Дума Р.В. Имитационное моделирование экономических процессов. — М.: Финансы и статистика, 2014. — 416 с.
72. Ostrogradsky M. In: Mem. de l'Acad. des Sci. de St-Petersbourg. — 1850. — Т. 8, N 3. — P. 33—48.
73. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. — ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. — 460 p.
74. Li Y., Ang K.H. and Chong G.C.Y. PID control system analysis and design — Problems, remedies, and future directions // IEEE Control Systems Magazine. — 2006. — Vol. 26, iss. 1. P. 32—41. — URL: <http://eprints.gla.ac.uk/3815/> (дата обращения 18.09.2018).
75. Макконелл К., Брю С.Л. Экономикс: проблемы и политика: в 2-х т., пер. с англ. — Таллин, 1993. — Т. 1. — 399 с.; Т. 2. — 400 с.
76. Трахтегенерц Э.А. Субъективность в компьютерной поддержке управленческих решений. — М.: СИНТЕГ, 2001. — 256 с.
77. Канторович Л.В., Макаров В.Л. Цены и эффективность производства // Экономика и математические методы. — 1984. — Т. XX, вып. 1. — С. 28—41.
78. Гусев В.Б. Отладка многопараметрических непрерывных шкал // Проблемы управления. — 2008. — № 1. — С. 36—42.
79. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. — М.: МЭИ, 2004. — 400 с.
80. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID control. — ISA — The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. — 460 p.
81. Поспелов И.Г. Математическое моделирование экономических структур. — М.: ФАЗИС, 2003. — 194 с.
82. Гусев В.Б., Исаева Н.А. Экспертный анализ системы управления нематериальными активами с учетом оценок рисков // Проблемы управления. — 2017. — № 1. — С. 31—39.
83. Гусев В.Б., Исаева Н.А. Анализ влияния нематериальных активов на инновационные процессы // Московский экономический журнал. — 2016. — № 4. — URL: <http://qe.su/innovatsii-i-modernizatsiya/moskovskij-ekonomicheskij-zhurnal-4-2016-32/>. (дата обращения 13.09.2018).
84. Гусев В.Б., Исаева Н.А. Анализ оценок временных затрат при управлении нематериальными активами // Московский экономический журнал. — 2016. — Т. 4. URL: <http://qe.su/upravlenie-predpriyatiem/2773/> (дата обращения 13.09.2018).
85. Гусев В.Б., Исаева Н.А. Рефлексивные процедуры анализа экспертных данных // Информационные технологии и вычислительные системы. — 2016. — № 2. — С. 31—35.
86. 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.
87. Гранберг Ю.Н. Основы региональной экономики — М.: ГУ ВШЭ, 2001. — 495 с.
88. Гусев В.Б. Достаточные условия стабильного развития при диверсификации экономики // Друкеровский вестник. — 2015. — № 3 (7). — С. 91—98.

Статья представлена к публикации руководителем регионального редсовета Г.А. Угольницким.

Гусев Владислав Борисович — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, gusvbr@mail.ru.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕЩАНИЙ В МАЛЫХ ГРУППАХ.

Ч. 1. Традиционные подходы к проблеме

Ю.В. Сидельников, А.В. Ряпухин

Рассмотрены основные понятия и базовые гипотезы исследования в области повышения эффективности совещаний в малых группах. Дан обзор моделей принятия решений на предприятиях и в организациях; основных разновидностей совещаний, проводимых малой группы специалистов; основных подходов к проблеме повышения эффективности совещаний.

Ключевые слова: совещание, эффективность, идентификация, процедура совещания.

*О, хотя бы
еще
одно совещание
относительно искоренения всех совещаний!*

По мотивам стихотворения
В. Маяковского «Прозаседавшиеся»

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время возникают все новые трудности в управлении промышленными предприятиями. Причин тому много — современные вызовы глобализации, ускоряющиеся темпы перемен окружающего мира, проблема сложности окружающего нас мира, недостаточная точность и качество прогнозов порождают все новые и новые трудности в управлении социально-экономическими и организационными системами регионального и странового масштабов. Есть трудности и методического, и методологического характера, среди них идентификация процедуры совещания. Например, некоторые разновидности совещаний и упрощенных экспертных технологий в российских и зарубежных научных источниках называют мозговыми атаками, что приводит к путанице с их применением. Например, такая широко известная процедура¹, как синектика [1] или метод конференции идей [2]. Хотя, как это было показано в статьях [3, 4], в этой процедуре и методе отсутствует механизм по-

лучения нового, присущий всем разновидностям мозговых атак. Кроме того, проблема осложняется и тем, что нет четкого размежевания вопросов менеджмента, принятия решений, экспертных процедур и собственно совещаний, а также экспертной поддержки принятия управленческих решений.

Изложенное подтверждает актуальность исследования, направленного на поиск новых подходов к решению проблемы повышения эффективности деятельности в виде совещаний малой группы специалистов при подготовке и принятии ими управленческих решений. Выделив этот отдельный класс совещаний, мы исходим из того, что именно новые нестандартные подходы, которые учитывают, например, психологию малых групп, стимулирование команд или модели принятия решений на предприятиях и организациях, могут помочь в решении указанной проблемы. Тем более, поскольку имеются интересные наработки специалистов, например, по психологии малых групп или стимулированию команд. Обычно повышение эффективности ищут не в выборе методов и подходов, а, например, в правильности составления повестки дня или, что популярно, в этических моментах, способности участников совещания играть разнооб-

¹ Скорее, упрощенная экспертная технология.



разные роли — «эксперта», «адвоката дьявола», «оппонента: черного, белого», «генератора идей», «аналитика», «критика», «регистратора ценных мыслей» и пр.

Различными аспектами этой проблемы занимались многие российские и зарубежные исследователи.

Объектом настоящего исследования является деятельность малой группы специалистов в форме совещания при подготовке и принятии ими управленческих решений. Цель исследования заключается в повышении эффективности данной деятельности. Из этой цели вытекают задачи:

- пояснение основных понятий;
- рассмотрение базовых гипотез исследования;
- обзор традиционных подходов к решению проблемы повышения эффективности совещаний, включая применение моделей принятия решений на предприятиях и в организациях (первая часть настоящей работы), и рассмотрение нестандартных подходов с тем, чтобы на их основе разработать соответствующие предложения и определить направления будущих перспективных исследований в рассматриваемой области (вторая часть [5]).

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Прежде чем обсуждать эффективность проведения совещания, поясним основные понятия: *совещание* и *эффективность* его проведения.

Многообразие не только разновидностей, но и классов совещаний достаточно велико. Так, например, появился такой достаточно новый класс совещаний, как сетевая экспертиза [6]. На наш взгляд, вряд ли существует набор рецептов, на основе которых можно повышать эффективность любого класса совещаний. Именно поэтому мы полагаем, что для поиска путей повышения их эффективности необходимо четко выделить и зафиксировать определенный класс совещаний.

В настоящее время существует достаточно много трактовок понятия *совещание* (см., например, сайт [7] или монографию [8]). В рамках данного исследования мы будем рассматривать класс таких совещаний, которые привычно проводят в организациях.

Для этой цели рассмотрим видовые характеристики понятия рассматриваемого класса совещаний. Другими словами, с учетом полисемии этого понятия, сузим его объем и будем рассматривать лишь класс совещаний, обладающих следующими характеристиками.

- Практически всегда резко ограничен круг потенциальных участников. По сути, это экспер-

тиза со «штатными», а не «случайными» экспертами. «Оптимальное число участников совместных обсуждений 6—7 чел. Увеличение числа приглашенных резко снижает средний коэффициент участия (или отдачи) присутствующих, одновременно удлиняя совещания» [8].

- При подборе кандидатов в группу участников, помимо компетентности, учитываются их социально-физиологические и психологические характеристики.
- В группе происходит непосредственное информационное взаимодействие (поэтому необходимо рассмотреть совместимость ее участников).
- Взаимодействует малая группа людей, которая очень часто преобразовывается в команду.
- Иерархическая структура группы практически всегда состоит из двух элементов (руководитель и группа участников).
- Тематический вид деятельности группы заранее задан, поскольку во многих случаях он закреплен в документах, характеризующих организацию, и тем самым достаточно четко определены типы задач.
- Деятельность участников направлена, в первую очередь, на подготовку и принятие управленческих решений и (или) на содействие реализации принятых решений.
- В процессе обмена мнениями или взглядами вырабатывается общая точка зрения по тому или иному вопросу для принятия решений.
- Срок проведения совещаний достаточно мал. «Обычная длительность совещания не должна превышать полутора-двух часов (после двух часов непрерывной работы большинству участников по чисто физиологическим причинам становится безразлично, как решится вопрос)» [8]. Максимальный срок указан в такой разновидности, как синектика (полный рабочий день в течение нескольких недель).
- У участников группы стандартная ролевая функция — эксперт, но типологии людей могут быть различными (см., например, работу [9]).
- Для отбора участников обычно применяют способ назначения. Однако в рамках этого способа, как правило, в группу попадают руководители подразделений данной организации, которые имеют право принимать решения в силу служебного положения. Вырабатываемое такой группой решение не обязательно наилучшее. Руководители подразделений часто не имеют времени, а порой и желания (полагаясь на свою интуицию) решать задачи новыми методами. Кроме того, в ряде случаев участник, зная лицо, распоряжением которого назначена группа, может стремиться выразить своей оценкой

не личное суждение, а мнение, соответствующее предполагаемым ожиданиям этого руководителя. Тем не менее, решение, выработанное данной экспертной группой, будет достаточно авторитетным как для руководителя, так и для других лиц, использующих результаты такой экспертизы.

Оценка *эффективности* — количественная мера, и ее можно измерить. Обычно оценка эффективности проведения совещания определяется как $\text{Эф}_c = \text{Эф}_p / Z_c$, где Эф_p — эффект от получения полезного результата на основе принятия решений совещания, Z_c — затраты, связанные с достижением этого результата по итогам проведения совещания. Что касается полезного результата и затрат, связанных с совещанием, то многим кажется, что их легко измерить. Например, путем подсчета трудозатрат участников, в человеко-часах. Но как измерить полезный результат и результативность участников? [10]. Например, удовлетворение участника совещания от его деятельности. При анализе возможны большие трудности.

Проведение совещаний — обычный прием руководителей предприятий при возникновении трудности в их деятельности. И все-таки, вполне уместен наводящий вопрос, зачем вообще нужно проводить совещание? По мнению авторов материала [7], специалисты выделяют три основные цели руководителя делового совещания в отношении других людей: сообщить информацию, научить, создать мотивацию. Сообщить информацию — значит дать другим людям полное представление о том, что является предметом делового взаимодействия. Совещание проводится, когда существует необходимость в:

- разъяснении задач, стоящих перед коллективом;
- выявлении мнений;
- обмене информацией и мнениями;
- анализе трудных (проблемных) ситуаций;
- подведении итогов работы за определенный период времени;
- принятии плана на будущее;
- подготовке и принятии необходимых решений в области управления предприятием по основополагающим или комплексным вопросам, так как коллективное обсуждение помогает найти выход из самой сложной ситуации, решить запутанные вопросы, выработать единую программу действий [7].

Именно последним в списке, но не по важности вопросом мы будем заниматься. Точнее, в случае, когда цель состоит в принятии эффективного управленческого решения, то все вышеуказанные цели являются вспомогательными. Мы рассматри-

ваем совещание как инструмент управления предприятием.

Основное отличие совещания от широко известных креативных методов, типа «мозговой атаки», состоит в целеполагании его организаторов. Совещание, в первую очередь, проводят для принятия решений и (или) содействия реализации принятия решений, путем достижения согласия его участников для совместного принятия решений. Получение новой информации от участников совещания не является главной его целью, в отличие от креативных методов и процедур.

2. БАЗОВЫЕ ГИПОТЕЗЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Весомый вклад в повышение эффективности производственных совещаний могут внести как традиционные, так и нестандартные подходы. Выдвинем базовые гипотезы, которые рассмотрим в настоящей статье. Мы полагаем, что эффективность совещания повышают:

- 1) отбор наиболее эффективной разновидности производственных совещаний на основе той или иной модели принятия решений на предприятиях и в организациях, используемой руководителем;
- 2) учет недостатков и достоинств разновидностей совещаний при их отборе;
- 3) применение методов такого научного направления, как «психология малых групп»;
- 4) применение методов стимулирования малых групп и команд.

Конечно, кроме перечисленных направлений можно и нужно для повышения эффективности совещаний воспользоваться и многими другими. Среди них «овладение основами деловой коммуникации, которое позволит специалистам эффективно взаимодействовать с деловыми партнерами, реализуя комфортно-психологическое общение и разнообразные стратегии и тактики, ориентированные на достижение компромисса и сотрудничества. А это, в свою очередь, снизит риск неблагоприятных последствий решений при ведении переговоров и консультировании, проведении деловых совещаний и собраний» [8]. Кроме того, необходимо учитывать зоны и дистанции в деловой коммуникации. Так, например, социальная зона² каждого из участников совещания может быть меньше чем обычно. Для достижения эффективного результата совещаний необходимо продумать не только личное пространство для участников

² Расстояние, на котором мы держимся от людей, которых не очень хорошо знаем или с которыми вовсе незнакомы, а также при взаимодействии с малой группой — 15 ± 7 чел. [11].



коммуникации, но и организацию пространственной среды, адекватную форме и целям встречи [8].

Поясним первую из гипотез, остальные рассмотрим во второй части [5] статьи.

3. МОДЕЛИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ И В ОРГАНИЗАЦИЯХ

Имея информацию о модели принятия решений, применяемой руководителем, мы можем обратить внимание на существенные параметры и характеристики процесса принятия решений в организациях. Конечно, если у нас такой коллективный субъект, как, например, команда, необходимо учитывать специфику принятия решений в команде. Знание существенных параметров и характеристик процесса принятия решений в организациях позволит подбирать разновидности наиболее эффективных совещаний. Прежде всего, следует грамотно задать критерии, по которым мы будем отбирать эти модели, а затем апробировать отобранные модели. Для выбора нужно иметь, по крайней мере, две различные модели. Среди моделей принятия решений в организации рассмотрим наиболее широко известные.

Модель «мусорной корзины» была предложена в работе [12] с целью объяснить схему принятия решений в условиях крайней неопределенности, которые авторы определили термином «организованная анархия». Она характеризуется тремя признаками: проблематичностью предпочтений; нечетко и плохо понимаемой технологией принятия решений; текучестью кадров. «Организованная анархия» свойственна организациям, для которых характерны частые изменения и коллегиальная небюрократическая обстановка. Уникальная особенность модели «мусорной корзины» состоит в том, что процесс принятия решения не выглядит как последовательность шагов, которые начинаются с проблемы, а заканчиваются решением. Эта модель описывает процесс принятия решений как хаотичное и беспорядочное взаимодействие или сочетание разнообразных «элементов», которые могут появляться и исчезать случайным образом независимо друг от друга. К таким элементам, наполняющим «корзину», авторы относят проблемы, решения, участников организации и альтернативы. Само решение может быть «оторвано» от процесса его принятия и обусловлено не рациональными причинами, а случайным стечением обстоятельств. «Организация представляет собой набор вариантов выбора, ищущих проблемы» [12]. Следуя работе [12], процесс принятия решения в организациях имеет четыре важные особенности: квазиразре-

шение конфликта; избегание неопределенности; проблемный поиск; организационное обучение.

Теория локальных приращений Ч. Линдблома. По мнению автора, «администратор часто чувствует себя более удобно, когда он «летает на задней части штанов», чем когда следует советам теоретиков» [13]. Стратегия локальных приращений (или способ последовательных ограниченных сравнений) характеризуется тем, что принятие решений имеет целью не кардинальные изменения в организации (как при рациональном подходе), а небольшие изменения, которые вносятся маленькими приращениями. Под приращением здесь понимается «маленькое изменение важной величины». По мнению Ч. Линдблома, процесс принятия решений в организациях осуществляется путем неопределенной и неупорядоченной серии маленьких движений от «болевыми точками» дня, а не в направлении заранее определенных целей, которые обычно остаются недостижимыми. Автор описывает такие характеристики данной стратегии, как ограниченность, ориентация на средства, реконструктивизм, серийность, практичность и фрагментарность [13].

Модель принятия решения руководителем В. Врума. По мнению автора, «гораздо больше смысла говорить о ситуациях участия и автократических ситуациях, чем говорить о менеджерах, которые действуют автократически и допускают участие» [14]. В результате исследований процесса принятия управленческих решений и различных вариантов участия в них подчиненных были сформулированы пять стилей (или процессов) принятия решений руководителем [15, 16]:

- вы решаете проблему или принимаете решение самостоятельно, используя всю информацию, которая имеется у вас в данный момент времени;
- вы получаете необходимую информацию от ваших подчиненных, а затем решаете проблему самостоятельно;
- вы излагаете проблему индивидуально тем подчиненным, кого это касается, выслушиваете их идеи и предложения, но не собираете подчиненных вместе в одну группу; затем самостоятельно принимаете решение;
- вы излагаете проблему группе подчиненных, коллективно собираете их идеи и предложения; затем самостоятельно принимаете решение, которое может отражать или не отражать мнение ваших подчиненных;
- вы излагаете проблему группе подчиненных; в процессе совместного обсуждения вы осуществляете поиск и оценку альтернатив и пытаетесь достичь согласия при решении проблемы.

Рассматриваемая модель принятия решения руководителем получила свое дальнейшее развитие в модели В. Врума и А. Джаго [15]. Новая модель позволяет оценить целесообразность привлечения подчиненных к принятию каждого конкретного решения. Она включает в себя три основных блока: стили руководства, набор диагностических вопросов для анализа ситуации, в которой принимается решение и правила принятия решений.

Конфликтно-игровая модель М. Круазье. По мнению автора, «организация может рассматриваться как набор игр между группами партнеров, которые должны играть друг с другом» [17]. Стратегическая модель организации М. Круазье помогает лучше понять особенности процессов принятия управленческих решений и позволяет сделать следующие выводы:

- управленческие решения в организациях всегда принимаются в условиях неопределенности; причем источником неопределенности может быть не только внешняя среда, но и поведение самих участников организации, которые преследуют собственные цели и стараются улучшить свое положение;

- руководители стараются «запрограммировать» как можно больше управленческих решений, чтобы повысить эффективность управления и уменьшить свою зависимость от специалистов, контролирующих основные факторы неопределенности, влияющие на организацию;

- подчиненные стремятся сохранить свободу в принятии решений и сопротивляются бюрократическому давлению со стороны руководителей;

- чтобы сохранить баланс власти в организации, подчиненные намеренно ограничивают информацию, предназначенную для руководителей, что приводит к необходимости принятия решений в условиях неопределенности и, следовательно, укрепляет власть специалистов, владеющих полной информацией [17].

4. КРАТКИЙ ОБЗОР ДРУГИХ ТРАДИЦИОННЫХ ПОДХОДОВ К ПРОБЛЕМЕ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВЕЩАНИЙ

Спектр современных зарубежных и российских традиционных подходов к проблеме повышения эффективности совещаний достаточно широк. Кратко рассмотрим некоторые из них.

Так, в статье [18] описываются способы повышения эффективности и результативности совещаний во время внутреннего аудита.

На основе изучения совещаний внутренних аудиторов разного уровня подготовки выработаны

рекомендации для внутренних аудиторов, чтобы сделать совещания максимально эффективными.

Было установлено, что внутренние аудиторы проводят значительное время на совещаниях, из которых 17 % считаются неэффективными. Такое времяпровождение на неэффективных совещаниях дорого обходится компаниям. Внутренние аудиторы отметили несколько факторов, которые способствовали снижению эффективности совещаний. В статье представлено резюме рекомендаций внутренних аудиторов для повышения эффективности совещаний.

В работе [19] автор указывает, что нужно тем, кто планирует и участвует в совещании:

- для каждой встречи требуется реалистичная и четкая повестка дня;
- избегайте ораторских выступлений или монополизации дискуссии;
- принимайте эффективные решения;
- культивируйте уважение к процессу принятия решений внутри группы;
- откажитесь от сплетен.

Поясним последнее. Участникам совещания необходимо указать, что в ряде случаев требуется конфиденциальность и объяснить почему, а также разрешено ли участникам совещания публично дистанцироваться от принятых решений, даже если они выражали свое несогласие надлежащим образом в пределах группы при его проведении.

В статье [20] автор полагает, что: «В практике военного руководства под совещанием очень часто подразумевается простая постановка задач, а само совещание есть не что иное, как монолог командира, и ни о какой совещательности речь, естественно, не идет». Автор поставил цель систематизировать основные сведения о методике проведения совещаний и выработать определенные рекомендации по оптимизации и повышению эффективности подготовки и проведения служебных совещаний. Автор выделяет причины, по которым необходимо указать руководителям на методические составляющие проведения совещаний. В статье выделены и описаны такие основные составляющие совещания, как цель, тема, повестка совещания, время и длительность его проведения, число участников и организация пространственной среды. Кроме того, предлагаются:

- наводящие вопросы, на которые должно отвечать должностное лицо, организующее совещание;
- правила проведения совещания в самом общем виде;
- правила для участников;
- типы вопросов, задаваемых в ходе проведения служебных совещаний.



Среди других современных работ отметим статьи [21–24].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из изложенного, можно заметить, что набор возможных подходов к повышению эффективности совещаний и соответствующих инструментов однообразен и довольно ограничен. Необходимо найти такие направления исследований и средства, которые обладают новым эвристическим потенциалом, содействующим повышению эффективности деятельности специалистов при подготовке и принятии ими управленческих решений. Конечно, для повышения эффективности совещаний следует учитывать и применять модели принятия решений на предприятиях и в организациях, а также учитывать трудности идентификации процедуры совещания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Панфилова А.П. Мозговые штурмы в коллективном принятии решений: учебное пособие: 2 изд. — М.: Флинта: МПСИ, 2007. — 320 с.
2. Лапыгин Ю.Н., Крылов В.Е., Чернявский А.П. Экономическое прогнозирование: учеб. пособие. — М.: Эксмо, 2009. — 256 с.
3. Сидельников Ю.В., Салтыков С.А. Процедура отбора прогнозных экспертных методов на основе установления соответствия между задачей и методом // Экономические стратегии. — 2008. — № 7. — С. 102–109.
4. Сидельников Ю.В., Салтыков С.А. Процедура отбора наиболее приемлемых разновидностей экспертных методов // Управление большими системами. — 2010. — № 30 (15). — С. 35–66.
5. Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В. Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 2. Нестандартные подходы к проблеме // Проблемы управления. — 2019. — № 1 (в печати).
6. Сетевая экспертиза: 2-е изд. / под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова, проф. А.Н. Райкова. — М.: Эгвес, 2011. — 166 с.
7. Деловое совещание. — URL: http://studopedia.ru/14_166503_delovoe-soveshchanie.html (дата обращения: 14.04.2018).
8. Панфилова А.П. Деловая коммуникация в профессиональной деятельности: учеб. пособие. — СПб.: Знание, 2001. — 496 с.
9. Маккормак М.Х. Секреты бизнеса для всех. Чему до сих пор не учат в бизнес-школах: пер. с англ. — М.: АСТ, 1998. — 178 с.
10. Кудряшов А. Эффективные совещания для эффективного управления компанией. — URL: https://www.cfin.ru/management/practice/eff_meeting.shtml (дата обращения: 23.10.2018).
11. Скаженик Е.Н. Деловое общение: учеб. пособие. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006.
12. Cohen M.D., March J.G., and Olsen J.P. Administrative Science Quarterly. — Mar., 1972. — Vol. 17, N 1. — P. 1–25.
13. Теория локальных приращений Чарльза Линдблума (Ch. Lindblom). — URL: https://decision-make.ru/index.php?action=full_article&id=297 (дата обращения 03.05.2018).
14. Vroom V.H. Work and Motivation, Revised Edition, Jossey-Bass Classics, 1995.
15. Vroom V.H., and Jago A.G. The New Leadership: Managing Participation in Organizations. — Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1988.
16. Vroom V.H. Leadership and the Decision Making Process // Organizational Dynamics. — Spring 2000. — Vol. 28, N 4. — P. 82–94.
17. Crozier M. et Friedberg E. Organizations as Means and Constraints of Collective Action. — In: M. Warner (ed.). Organizational Choice and Constraint. — London: Publishers of Grower Press, Saxon House, 1977.
18. Lambing K.A. Increasing Meeting Effectiveness for Internal Auditors / The IIA Research Foundation — Donald E. Ricketts Research Award Competition. — Jan. 2008. — 32 p. — URL: <https://global.theiia.org/iia/PUBLIC%20Documents/Increasing%20Meeting%20Effectiveness%20for%20Internal%20Auditors%20-%20St.%20Louis.pdf> (дата обращения 30.08.2018).
19. Potter C.B. Why Can't We Get Anything Done? How To Run An Effective Meeting. — June 16, 2010. — URL: <https://www.chronicle.com/blognetwork/tenuredradical/2010/06/why-cant-we-get-anything-done-how-to/> (дата обращения 31.08.2018).
20. Тарасов М.В. Методика подготовки и проведения служебных совещаний // Журнал РОД «За права военнослужащих». — 2005. — № 9. — URL: <http://voenprav.ru/doc-3266-1.htm> (дата обращения 21.06.2018).
21. Heffernan V. Meet is Murder // The New York Times Magazine. — 2016. — Feb. 25. — URL: <https://www.nytimes.com/2016/02/28/magazine/meet-is-murder.html> (дата обращения 03.09.2018).
22. Nicholas C., Romano Jr., Jay F., Nunamaker Jr. Meeting Analysis: Findings from Research and Practice // Proc. of the 34th Hawaii Int. Conf. on System Sciences. — 2001. — URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.570.6650&rep=rep1&type=pdf> (дата обращения 05.09.2018).
23. Jolly V.B., Kyogabirwe B.J. Organizational meetings: management and benefits // Journal of Management Development. — 2015. — Vol. 34, iss. 8. — P. 960–972. — URL: https://www.researchgate.net/publication/281465172_Organizational_meetings_Management_and_Benefits (дата обращения 10.09.2018).
24. Leach D.J., Rogelberg S.G., Warr P.B., Burnfield J.L. Perceived Meeting Effectiveness: The Role of Design Characteristics // Journal Business Psychology. — 2009. — N 4. — P. 65–76. — URL: <http://orgwise.ca/sites/osi.ocasi.org.stage/files/Perceived%20Meeting%20Effectiveness%20-%20The%20Role%20of%20Design%20Characteristics.pdf> (дата обращения 12.09.2018).

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Е. Ленским.

Сидельников Юрий Валентинович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), sidelnikov@mail.ru,

Ряпухин Анатолий Вячеславович — зам. начальника отдела, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Ryapukhin_av@mail.ru.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ В ЦЕПИ ПОСТАВОК ПРИ НАЛИЧИИ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПОСТАВЩИКОВ

С.С. Гранин, А.С. Мандель

Рассмотрена задача управления запасами, связанная с оптимизацией процессов, которые возникают в цепи поставок при наличии нескольких альтернативных поставщиков с разными степенями надежности и разными эконометрическими характеристиками. Исследовано два случая: (а) фиксированная часть затрат на поставку у всех поставщиков одна и та же при не совпадающих ценах на единицу товара и (б) все компоненты затрат у разных поставщиков различны. Для случая (а) предложены конструктивные алгоритмы построения оптимальных стратегий управления запасами и выбора поставщиков. Для случая (б) построена общая схема формирования оптимальных стратегий. Приведены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: управление запасами, цепи поставок, альтернативные поставщики, динамическое программирование.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в области теории и приложений управления производственно-складскими системами все большее число работ посвящено решению проблем, собранных под общим наименованием «управление цепями поставок» (supply chain management) [1–5]. Интерес к этому классу задач обусловлен прикладной актуальностью этой темы: большее число предлагаемых моделей, алгоритмов и решений либо изначально разрабатывались для принятия решений в конкретных практических ситуациях, либо рано или поздно находят свои приложения.

Все множество рассматриваемых проблем разбивается на два класса: (а) задачи, рассматриваемые на сети производственных и распределительных центров, которые сводятся к различным вариациям задач математического программирования и лишь опосредованно (через некие упрощенные интегральные характеристики) учитывают стохастический характер процессов снабжения и производства, и (б) детальное исследование ситуаций оперативного управления цепями поставок, связанных с различными сбоями (в том числе, и случайной природы) на запланированных заранее цепях поставок. Одним из основных источников

таких сбоев является ненадежность поставщиков, т. е. наличие ненулевой вероятности того, что поставщик сорвет заказанную ему поставку.

Последний класс задач весьма близок к классической проблематике современной теории управления запасами, в которой, начиная с 1980-х гг., исследовались задачи управления запасами с ненадежными поставщиками (см. подытоживающую эти исследования книгу [6]).

В настоящей статье, которая развивает результаты работ [7–10], рассматривается одна из таких задач, а именно, задача управления запасами при случайном спросе при наличии альтернативных поставщиков с разными уровнями надежности.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается однономенклатурная система управления запасами в дискретном времени на периоде планирования $T = N\tau$. Здесь τ — период контроля состояния запасов. Моментами принятия решений о размере заказов являются дискретные моменты времени $t_k = k\tau$, $k = 1, 2, \dots, N - 1$. Весь неудовлетворенный сразу потребительский спрос учитывается. В качестве правила оценки эффективности системы выбран критерий минимума суммарных средних затрат на периоде планирования T . Интервал длительности τ называется шагом



процесса управления. В начальный момент каждого такого интервала, шага, измеряется значение фиктивного уровня запасов¹ x , и на основании результатов измерения следует принять решение о необходимости подачи (или неподачи) заказа на пополнение запасов, поступающего в систему за пренебрежимо малое время θ , и о размере заказа u .

В суммарные затраты входят затраты на пополнение запасов, затраты на хранение и потери вследствие дефицита. В силу дискретности измерения времени считается, что на очередном шаге периода планирования в конце его, завершаемом с уровнем фиктивного запаса y , выплачиваются затраты на хранение в размере hy , если $y > 0$, или несутся потери вследствие дефицита в размере $-dy$, если $y < 0$.

Спрос на k -м шаге (в интервале между $(k-1)$ -м и k -м моментами контроля) описывается случайной величиной z_k . Предполагается, что случайные величины $\{z_k\}$ независимы в совокупности и имеют одно и то же вероятностное распределение с функцией распределения $F(z)$ с плотностью вероятности $f(z)$.

Затраты на пополнение запасов в размере u связаны с подачей заказа одному из M поставщиков. Эти затраты при подаче заказа j -му поставщику описываются функцией $A_j \mathbf{1}(u) + c_j u$, где A_j — фиксированная часть затрат на поставку у j -го поставщика, $\mathbf{1}(u)$ — функция Хэвисайда (единичного скачка), которая равна единице для положительных u и нулю для отрицательных u , а c_j — закупочная цена единицы продукции у j -го поставщика. Предполагается, что поставщики ненадежны, и для каждого из них существует вероятность p_j того, что j -й поставщик полностью сорвет поставку (соответственно, с вероятностью $1 - p_j$ поставка будет обеспечена). Считается, что сорвавший пополнение запасов поставщик не получает платы за поставку. При этом считается (см. выше), что время запаздывания поставки θ у всех поставщиков равно нулю, поэтому при срыве поставки одним из поставщиков заказ на поставку тут же передается другому поставщику. Таким образом, каждый из поставщиков характеризуется тройкой (A_j, c_j, p_j) .

В дальнейшем будет рассмотрено два варианта предложенной постановки задачи: (а) когда все величины A_j равны между собой, т. е. $A_j = A$, и (б) когда все A_j — разные. Как будет ясно из дальнейшего, в варианте (а) удастся получить гораздо более конструктивные результаты. Однако более глубокая причина выделения варианта (а) состоит

в том, что он гораздо чаще встречается на практике. Дело в том, что, как правило, фиксированная часть затрат на пополнение запасов связана с необходимостью использования транспортных средств для перевозки на склад потребляемой продукции, и эти транспортные средства заказываются покупателем продукции. При этом фиксированная часть затрат на транспортное средство оказывается для всех поставщиков одной и той же.

2. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В СЛУЧАЕ ПОСТОЯНСТВА ФИКСИРОВАННОЙ ЧАСТИ ЗАТРАТ НА ПОСТАВКУ У РАЗНЫХ ПОСТАВЩИКОВ: ВАРИАНТ (а)

В этом случае каждый из поставщиков характеризуется парой (c_j, p_j) . Очевидно, что, если найдутся два поставщика с номерами i и j , для которых одновременно выполнены два неравенства: $c_j \geq c_i$ и $p_j \geq p_i$, то поставщик под номером j заведомо проигрывает поставщику i (он и дороже, и менее надежен). Таким образом, как отмечено в работе [10], если в качестве критерия выбран минимум суммарных средних затрат, то в множестве M поставщиков следует выделить подмножество Парето-оптимальных поставщиков, удалив из списка поставщиков всех поставщиков, у которых пара (c_j, p_j) обладает тем свойством, что найдется другой поставщик под номером i , для которого пара (c_i, p_i) обладает тем свойством, что $c_j \geq c_i$ и $p_j \geq p_i$, причем хотя бы одно из этих неравенств строгое. Итак, в дальнейшем будем считать, что множество поставщиков L является подмножеством Парето. Иначе говоря, для всех $i, j \in \{1, 2, \dots, L\}$ справедливы пары неравенств $c_j \geq c_i$ и $p_i \geq p_j$ либо $c_j \leq c_i$ и $p_i \leq p_j$. При этом будем считать, что номера поставщиков упорядочены по возрастанию цены единицы товара, т. е. $c_1 \leq c_2 \leq \dots \leq c_L$. Будем также считать, что $p_L = 0$, т. е. среди поставщиков имеется, по крайней мере, один абсолютно надежный (разумеется, с самой высокой ценой товара).

Теорема. На каждом шаге оптимальная последовательность обращений к поставщикам совпадает с их нумерацией (т. е. сначала заказчик обращается к поставщику 1, затем при его неудаче — к поставщику 2, ... вплоть до обращения к последнему поставщику под номером L из подмножества Парето).

Доказательство. При критерии минимальных суммарных средних затрат последовательность обращений к поставщикам сказывается на каждом шаге на значении цены заказываемого товара. При том способе нумерации поставщиков, который назван оптимальным в формулировке теоремы, средняя цена поставляемого товара составит величину $c(1, 2, \dots, L)$:

$$c(1, 2, \dots, L) = (1 - p_1)c_1 + p_1(1 - p_2)c_2 + p_1p_2(1 - p_2)c_3 \dots + p_1p_2 \dots p_{L-1}c_L. \quad (1)$$

¹ По определению [11], фиктивный уровень запаса равен наличному запасу + еще не пришедшие, но уже заказанные поставки — учтенный задолженный спрос.

Теперь воспользуемся перестановочным методом, впервые предложенным в работе [12]. Докажем, что при любом другом упорядочении поставщиков $(i_1, i_2, \dots, i_L)$, где $(i_1, i_2, \dots, i_L)$ — произвольная перестановка множества номеров $(1, 2, \dots, L)$, для средней цены товара при его заказе может только возрасти, т. е. $c(1, 2, \dots, L) \leq c(i_1, i_2, \dots, i_L)$. Здесь $c(i_1, i_2, \dots, i_L)$ вычисляется по формуле, аналогичной формуле (1):

$$c(i_1, i_2, \dots, i_L) = (1 - p_{i_1})c_{i_1} + p_{i_1}(1 - p_{i_2})c_{i_2} + p_{i_1}p_{i_2}(1 - p_{i_3})c_{i_3} \dots + p_{i_1}p_{i_2} \dots p_{i_{L-1}}c_{i_L}. \quad (2)$$

Докажем сначала более простой факт: если в перестановке $(i_1, i_2, \dots, i_L)$ встретились по соседству, начиная с произвольного места под номером l : $1 \leq l \leq L - 1$, два номера таких, что для них $c_{i_l} \geq c_{i_{l+1}}$, то, поменяв местами этих поставщиков, среднюю цену единицы товара можно только уменьшить. Обозначим для простоты $c_{i_l} = a$, $c_{i_{l+1}} = b$, $p_{i_1}p_{i_2} \dots p_{i_{l-1}} = D$, $p_{i_l} = d$ и $p_{i_{l+1}} = e$. При такой перемене мест двух соседних элементов в сумме, определяемой формулой (2) изменятся только два слагаемых — l -е по счету и $(l + 1)$ -е. Используя введенные обозначения, запишем значения этих слагаемых до и после перемены мест. До перемены мест обозначим сумму этих двух слагаемых Y , а после перемены мест Z . Тогда

$$Y = D(1 - d)a + Dd(1 - e)b, \quad (3)$$

$$Z = D(1 - e)b + De(1 - d)a. \quad (4)$$

Подсчитаем разность

$$Z - Y = D(1 - e)b + De(1 - d)a - D(1 - d)a - Dd(1 - e)b = D(1 - d)(1 - e)(b - a).$$

В силу того, что, по предположению, $b \leq a$, разность $Z - Y \leq 0$. Теорема доказана. ♦

Итак, установлен факт: любая перестановка двух соседних (по последовательности обращения к ним) поставщиков, у которых цены (по величине) «перепутаны», приводит к снижению средней цены товара. Естественно, верно и обратное: если двух соседних поставщиков с «правильно» упорядоченными ценами поменять местами, то средняя цена увеличится.

Отсюда следует утверждение теоремы, поскольку произвольная индексация поставщиков в последовательности $(i_1, i_2, \dots, i_L)$ может быть получена из «правильной» индексации $(1, 2, \dots, L)$ посредством выполнения конечного числа «плохих» попарных перестановок. Действительно, сначала поставщик под номером i_1 переставляется на первое место ($(i_1 - 1)$ «плохих» попарных перестановок), затем с помощью только «плохих» перестановок на второе место ставится поставщик под номером i_2 и т. д., пока на последнем месте не окажется поставщик под номером i_L .

Теперь предположим, что за n шагов (длительности τ) до конца периода планирования фиктивный уровень запаса в системе равен x и принима-

ется решение о подаче заказа размера u . Тогда средние одношаговые затраты на шаге между моментами t_n и t_{n-1} (в обратном дискретном времени) составят величину

$$\varphi(x, u) = A1(u) + cu + h \int_0^{x+u} (x + u - z)f(z)dz + d \int_{x+u}^{\infty} (z - x - u)f(z)dz, \quad (3)$$

где c определяется по формуле (1).

Если ввести функцию минимально возможных средних затрат для n -шагового процесса, который начинается с фиктивного уровня запасов x , обозначив ее $C_n^*(x)$, то нетрудно убедиться в том, что эта функция удовлетворяет уравнению дискретного динамического программирования:

$$C_n^*(x) = \min_{u \geq 0} \left\{ \varphi(x, u) + \alpha \int_0^{\infty} C_n^*(x + u - z)f(z)dz \right\}, \quad (4)$$

где α — коэффициент дисконтирования, $0 \leq \alpha \leq 1$, с начальным условием

$$C_0^*(x) = 0. \quad (5)$$

Как следует из вида уравнений (4) и (5), для них справедливы все выводы теории управления запасами [11] и, в частности, факт оптимальности двух-уровневых (R, r) -стратегий управления запасами. Иначе говоря, для каждого натурального n существуют такие два числа r_n и R_n , что $r_n < R_n$, и оптимальный размер заказа за n шагов до конца периода планирования при текущем фиктивном уровне запаса x вычисляется по формуле:

$$u_n^*(x) = \begin{cases} R_n - x, & \text{если } x < r_n, \\ 0, & \text{если } x \geq r_n. \end{cases}$$

При этом существуют пределы при $n \rightarrow \infty$ монотонно возрастающих последовательностей $\{R_n\}$ и $\{r_n\}$. Обозначим эти пределы, параметры оптимальной стационарной управления запасами, R и r . Представляет интерес изучить, как эти пределы зависят от таких параметров, как h , d и α . Соответствующие результаты будут частично представлены далее в § 4.

3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ В СЛУЧАЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИКСИРОВАННОЙ ЧАСТИ ЗАТРАТ НА ПОСТАВКУ У РАЗНЫХ ПОСТАВЩИКОВ: ВАРИАНТ (б)

В этом случае, как и в варианте (а), последовательность выбора поставщика обусловлена тем, что размер платежа поставщику должен быть как мож-

но меньше. Однако та логика, которой можно было руководствоваться в § 2 (выделение подмножества Парето-оптимальных поставщиков и последующие действия), перестает работать. Правда, можно исключить поставщиков с характеристической тройкой параметров (A_i, c_i, p_i) , для которых найдется такой поставщик под номером j , у которого $A_j \leq A_i$, $c_j \leq c_i$ и $p_j \leq p_i$. Считая, что подобное «прореживание» выполнено, воспользуемся результатом предыдущего параграфа, который в данном случае будет применяться как эвристическое правило.

Эвристическое правило: последовательность обращения к поставщикам обуславливается их упорядочением по возрастанию затрат на поставку размера u , т. е. в данном случае последовательность обращений зависит от размера заказа u . ♦

Итак, каждое упорядочение поставщиков $(i_1(u), i_2(u), \dots, i_L(u))$ строится по возрастанию величины $A_{j_1}(u) + c_{j_1}u$. При этом одношаговые затраты $\varphi(x, u)$ определяются уже не по формуле (3), а с помощью формулы, которая комбинирует формулы (2) и (3):

$$\varphi(x, u) = A_j \mathbf{1}(u) + c(u)u + h \int_0^{x+u} (x+u-z)f(z)dz + d \int_{x+u}^{\infty} (z-x-u)f(z)dz, \quad (6)$$

где

$$A(u) = (1 - p_{i_1(u)})A_{i_1(u)} + p_{i_1(u)}(1 - p_{i_2(u)})A_{i_2} + p_{i_1(u)}p_{i_2(u)}(1 - p_{i_3(u)})A_{i_3} + \dots + p_{i_1(u)}p_{i_2(u)} \dots p_{i_{L-1}(u)}A_L, \quad (7)$$

$$c(u) = (1 - p_{i_1(u)})c_{i_1(u)} + p_{i_1(u)}(1 - p_{i_2(u)})c_{i_2} + p_{i_1(u)}p_{i_2(u)}(1 - p_{i_3(u)})c_{i_3} + \dots + p_{i_1(u)}p_{i_2(u)} \dots p_{i_{L-1}(u)}c_L. \quad (8)$$

Функции $\varphi(x, u)$ из формул (6)–(8) подставляются в алгоритм (4), (5), который и позволяет рассчитать оптимальные размеры заказов.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В отличие от работы [7], в которой для более простой задачи моделирование охватывало все упомянутые выше варианты зависимостей суммарных средних затрат (от параметров d , h и α), в настоящей работе мы представим результаты моделирования при построении зависимости оптимальных значений параметров стратегии управления запасами от коэффициента дисконтирования α .

При моделировании исследовался вариант (а). Функция плотности вероятности $f(z) = F'(z)$ в нашей модели имеет вид функции Гаусса (как наиболее часто встречающийся, наряду с равномерным и пуассоновским распределениями, на практике вариант):

$$f(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}},$$

где математическое ожидание $\mu = 5$, а среднеквадратическое отклонение $\sigma = 1$. Малость среднеквадратического отклонения по сравнению с математическим ожиданием позволяет считать, что физически нереальные отрицательные значения спроса будут встречаться в пренебрежимо малом числе реализаций, т. е. приближение хорошее.

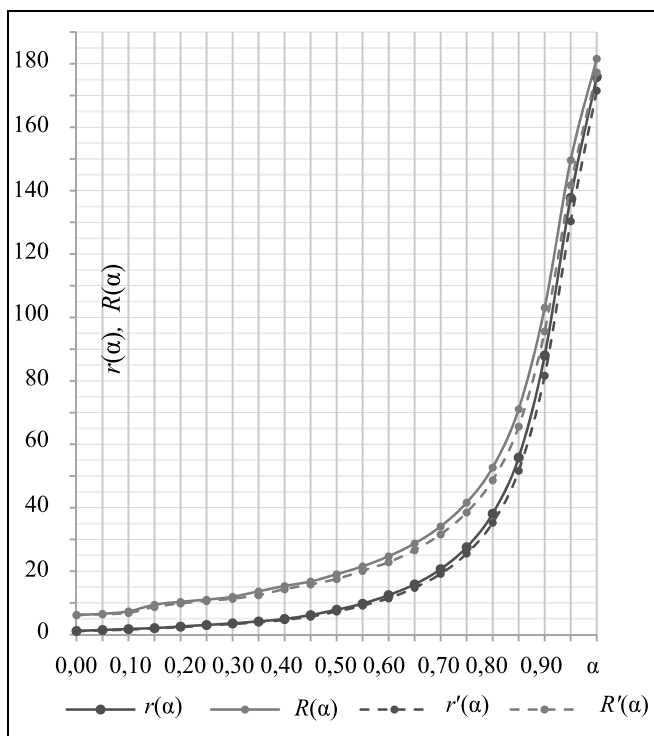
Для большей наглядности (и в соответствии с соображениями практики), значения стоимостных параметров (в условных единицах) были подобраны таким образом: стоимость одной поставки $A = 100$, цена хранения единицы товара $h = 1$, потери, связанные с дефицитом товара $d = 30$. Промоделированы два случая. Случай 1 — прямой порядок (оптимальный) пар поставщиков $(1; 0,9)$, $(2; 0,5)$, $(3; 1)$, при котором средняя цена единицы товара $c = 2,35$ (по формуле (1)). Случай 2 — обратный (по отношению к оптимальному) порядок поставщиков $(3; 1)$, $(2; 0,5)$, $(1; 0,9)$, при котором $c = 3$.

4.1. Результаты моделирования

Полученные результаты моделирования показаны на рисунке. Видно, что при изменении порядка (относительно оптимального выбора) поставщиков будет возрастать средняя цена поставки (в соответствии с теоремой), что в свою очередь будет вызывать понижение значений оптимальных параметров двухуровневой стратегии управления запасами $r(\alpha)$ и $R(\alpha)$ (а также снижение значения $R(\alpha) - r(\alpha)$), что на практике приводит к уменьшению размера заказов на каждом шаге (подтверждено при моделировании).

4.2. Технические особенности процесса моделирования

Модель обшчитывалась в MATLAB 2015a Student (с дополнительными пакетами Symbolic Math Toolbox & Parallel Computing Toolbox). Среднее время расчетов на процессоре Intel Core i7 2,3 GHz составляет 24 ч. Шаг по x (и внутренним переменным y и z) был выбран равным 0,1. При временном шаге, равном 1, разница оптимальных значений $r(\alpha)$ и $R(\alpha)$ составляла от 15 до 5 % (в порядке возрастания α). Дальнейшее уменьшение шага по x , y и z разумно остановить на отметке 0,05 (при этом время расчетов вырастет линейно в два раза).



Зависимости оптимальных параметров двухуровневой стратегии управления запасами $r(\alpha)$ и $R(\alpha)$ от коэффициента дисконтирования. Оптимальный (сплошная линия) и обратный оптимальному (штриховая линия) порядки поставщиков

Шаг коэффициента дисконтирования α равен 0,05. Число шагов для уравнивания суммарных средних затрат $N = 40$ (при $N = 35$ приращение целевой функции $C_n(x)$ на последнем шаге составляет не более 5 %).

Возможные пути оптимизации скорости расчетов — распараллеливание вычислений по α при помощи дополнительного пакета Parallel Computing Toolbox. В этом случае создаются параллельные пулы процессов, число которых не может превышать числа виртуальных ядер. В рассматриваемом случае 4 физических ядра умножаются на 2 потока (технология Intel Hyper-Threading), в результате получается 8 параллельных потоков (однако не факт, что скорость расчетов возрастет восьмикратно). В дальнейших исследованиях предпочтительно воспользоваться более низкоуровневым (по доступу к аппаратной части) языком программирования. Например, языком C++, как наиболее производительным и кроссплатформенным. Однако, в силу крайне неудобной среды разработки и отладки C++ (по сравнению с тем же Matlab), возможен компромиссный вариант: новые модели создавать в Matlab (во избежание снижения скорости разработки), а рабочие решения переносить на C++.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача об управлении запасами в простейшей цепи поставок при наличии нескольких поставщиков с разными ценами поставки и разными вероятностями срыва поставки. Построен алгоритм формирования оптимальных стратегий пополнения запасов. Дальнейшие исследования будут направлены на усложнение модели, включая учет насыщения отдельных поставщиков при наличии ограничений на интенсивности их работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ettl M., Feigin G.E., Lin G.Y., Yao D.D. A supply network model with base-stock control and service requirements // *Operation Research*. — 2000. — N 48. — P. 21–28.
2. Graves S.C., Wilems S.P. Supply chain design safety stock placement and supply chain configuration // *Handbook in OR & MS*. — 2003. — N 11. — P. 95–132.
3. Justus N., Meyr H. Designing a Planning System for Suppliers of the Ma-chine Building Industry / Technical program of IFORS-2014 World Conference, Barcelona, 2014. — P. 3.
4. Pishchulo G., Richter K., Golesorkhi S. Supply Chain Contracting under Asymmetric Information and Partial Vertical Integration / Technical program of IFORS-2014 World Conference. — Barcelona, 2014. — P. 18.
5. Alegoz M., Ozturk Z.K. A Goal Programming Approach to Design the Supply Chain Network / Technical program of IFORS-2014 World Conference. — Barcelona, 2014. — P. 27.
6. Лотоцкий В.А., Мандель А.С. Модели и методы управления запасами. — М.: Наука, 1991. — 192 с.
7. Вильмс М.А., Мандель А.С., Барладян И.И., Токмакова А.Б. Локальная модель управления цепями поставок при ненадежных поставщиках // *Управление большими системами*. — 2015. — Вып. 59. — С. 147–164.
8. Mandel A., Vilms M. Local Supply Chain Control Model with Unreliable Suppliers // *Proc. of the 8th IFAC Conf. on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM 2016, Troyes, France)*. — Troyes, 2016. — P. 465–470.
9. Granin S., Mandel A. Stationary Inventory Control Policies in Supply Systems under Inflation Condition // *Automation and Remote Control*. — 2016. — Vol. 77, N 8. — P. 1453–1460.
10. Вильмс М.А., Гранин С.С., Мандель А.С. Моделирование процесса управления запасами в цепи поставок при наличии нескольких поставщиков // *Управление развитием крупномасштабных систем. Тр. десятой междунар. конф. / ИПУ РАН*. — М., 2017. — Т. 1. — С. 186–190.
11. Хедли Дж., Уайтин Т. Анализ систем управления запасами. — М.: Наука, 1969. — 512 с.
12. Бронштейн О.И., Рыков В.В. Об оптимальных приоритетах в системах массового обслуживания // *Известия АН СССР. Техническая кибернетика*. — 1965. — № 6. — С. 28–37.

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

Гранин Сергей Сергеевич — аспирант, Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, ✉ ssggranin@gmail.com,

Мандель Александр Соломонович — д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; профессор, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ✉ almandel@yandex.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ АНАЛИЗА КОНЕЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ И МЕТОДА ОБРАТНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ И ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

С.Л. Блюмин, Г.С. Боровкова

Предложен метод управления организационными системами, отличающийся применением метода обратных вычислений и анализа конечных изменений. Проиллюстрирована работа нового метода, представлены анализ и сравнение результатов применения двух теорем анализа конечных изменений в рамках разработанного метода.

Ключевые слова: анализ конечных изменений, теорема Лагранжа, вторая теорема о среднем, метод обратных вычислений.

ВВЕДЕНИЕ

Анализ конечных изменений (АКИ) можно считать важным связующим этапом между учетом, который необходим для обобщения данных и контроля выполнения плана, и принятием управленческих решений. Анализ предшествует решениям и действиям, обосновывает их и служит основой научного управления процессом, обеспечивая его объективность и эффективность. Анализ конечных изменений является развитием экономического факторного анализа, что позволяет считать его новой областью экономического анализа [1].

Анализ конечных изменений, при котором параметры промежуточных точек находятся по теореме Лагранжа, называется лагранжевым анализом конечных изменений (ЛАКИ). Кроме теоремы Лагранжа, эти параметры можно найти и по формулам Бонне, и по второй теореме о среднем [2, 3]. Средняя точка играет первостепенную роль в АКИ, поскольку служит для нахождения факторных нагрузок и факторных влияний, которые, в свою очередь, необходимы для анализа влияния изменения факторов на изменение исследуемого показателя, что на практике служит базой для принятия решений и управления в социально-экономических и производственных системах.

Задачи анализа таких систем, как правило, подразделяются на два типа: прямые и обратные. Прямые задачи — это констатирующие задачи, когда

заданы значения исходных показателей, на основании которых рассчитываются результирующие, что позволяет оценить текущее состояние системы, сделать прогноз на будущие периоды, исследовать влияние факторов на выходную величину. Обратные задачи, в отличие от задач прямого счета, предназначены для поиска тех значений исходных факторов, которые обеспечат желаемое значение результирующего. Искомые величинами будут приращения (положительные или отрицательные) исходных независимых величин. Полученная информация может быть использована для формирования управленческих решений. Известный метод решения обратных задач называется методом обратных вычислений (МОВ). Он предваряет АКИ в ряде прикладных задач, когда конечные значения исследуемых величин не известны или их требуется найти в связи с условием решаемой задачи. Их синтез будет рассмотрен далее.

1. АНАЛИЗ КОНЕЧНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ И МЕТОД ОБРАТНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Анализ конечных изменений — это метод, который позволяет оценить влияние изменений факторов на изменение результирующего показателя. Он включает в себя и ЛАКИ, в основе которого лежит теорема Лагранжа, и цепной ЛАКИ, который позволяет учитывать динамику изменений исследуемых объектов, и новые методы, основанные на

других теоремах математического анализа. Широкий выбор инструментов АКИ делает его универсальным методом исследования социально-экономических и организационных систем.

Теорема Лагранжа, иначе теорема о среднем дифференциального исчисления, для функции нескольких переменных может быть сформулирована на таком образом: пусть задана функция $y = f(x) = f(x_1, \dots, x_n)$, $x \in R^n$, и значения ее аргументов $x^{(0)} = (x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ — начальные (плановые) и $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ — конечные (фактические), что позволяет непосредственно вычислить плановое значение функции $y^{(0)} = f(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})$ и фактическое $y^{(1)} = f(x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$, а также меры μ конечных изменений φ аргументов и функции

$$\varphi(x_i) = \mu(x_i^{(1)}, x_i^{(0)}), \quad i = 1, \dots, n,$$

$$\varphi(y) = \mu(y^{(1)}, y^{(0)}).$$

Основная задача АКИ состоит в построении по функции f , связывающей ее значения со значениями аргументов, некоторой другой функции Φ , связывающей изменения ее значений с изменениями значений аргументов:

$$\varphi(y) = \Phi(\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n)). \quad (1)$$

Тогда, в случае абсолютных приращений дифференциальная теорема Лагранжа о среднем значении позволяет представить функцию для приращений (1) в виде

$$\begin{aligned} \Delta y &= \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1^{(0)} + \alpha \Delta x_1, \dots, x_n^{(0)} + \alpha \Delta x_n)}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i = \\ &= \sum_{i=1}^n L_i \Delta x_i = \sum_{i=1}^n A_{x_i}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $0 \leq \alpha \leq 1$ — лагранжев параметр, $x_i^{(0)} + \alpha \Delta x_i$ — средняя точка, $L_i = f'_{x_i}(x_i^{(0)} + \alpha \Delta x_i)$ — факторные нагрузки, A_{x_i} — факторные влияния, $i = 1, \dots, n$.

Средняя (промежуточная) точка служит для нахождения факторных влияний, которые раскладывают изменение функции на части, пропорциональные влиянию изменений соответствующих аргументов. Иными словами, чем больше факторное влияние соответствующего фактора, тем сильнее меняется показатель при его изменении.

Кроме теоремы Лагранжа, параметры средней точки можно найти и с помощью формул Бонне и второй теоремы о среднем. В данной работе рассмотрим вторую теорему о среднем, поскольку ограничения, накладываемые на исследуемую функ-

цию ее формулировкой, универсальны и подходят практически для любой функции [4]. Формулировка второй теоремы о среднем приведена в учебнике [5, п. 306, 14, с. 131, формула (4)]: если на отрезке $[a, b]$ функция $f(x)$ монотонна, а функция $g(x)$ — интегрируема, то

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(a) \int_a^\xi g(x)dx + f(b) \int_\xi^b g(x)dx, \quad a < \xi < b.$$

Вторая теорема о среднем значении касается свойств интеграла от произведения двух функций и может быть сформулирована в разных формах [6]. Если в ней положить $g(x) \equiv 1$, что не противоречит ее формулировке, $\xi = a + \tau \Delta x$, получаем уравнение для нахождения параметра средней точки τ в дифференциальном исчислении

$$\Delta y = f(b) - f(a) = f'(a)\tau \Delta x + f'(b)\Delta x(1 - \tau).$$

Как видно, в данную формулу параметр промежуточной точки входит линейно в отличие от формулы Лагранжа (2), где этот параметр стоит под знаком производной, что усложняет процесс его поиска, а в случае второй теоремы о среднем позволяет получить его выражение напрямую:

$$\tau = \frac{\Delta y / \Delta x - f'(b)}{f'(a) - f'(b)}.$$

Эта формула отличается от формулы (2) тем, что позволяет быстрее и проще, в силу своего вида, найти параметр средней точки, не потеряв при этом точность.

Распишем приращение для функции многих переменных $y = f(x_1, \dots, x_n)$:

$$\begin{aligned} \Delta y &= \\ &= \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})}{\partial x_i} \tau + \frac{\partial f(x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})}{\partial x_i} (1 - \tau) \right) \Delta x_i = \\ &= \sum_{i=1}^n B_i \Delta x_i = \sum_{i=1}^n A_{x_i}, \end{aligned} \quad (3)$$

откуда видно, что факторные нагрузки и факторные влияния из формулы (2), найденные по теореме Лагранжа, совпадают с соответствующими величинами из формулы (3), т. е. $L_i = B_i$, $i = 1, \dots, n$. В данной работе мы сравним обе теоремы на практике (см. § 2).

В то же время, основная цель МОВ — это управление результирующими значениями факторов и исследуемого показателя, что является обязательным этапом процесса управления и принятия решений. Более подробно особенности МОВ представлены в статьях [7–9]. До сих пор АКИ оперировал заранее известными результирующими ($x^{(1)}$)



и исходными ($x^{(0)}$) значениями факторов и исследуемого показателя, как показано на схеме:

Метод:	МОВ	АКИ
Известно:	$x^{(0)}, y^{(0)}$ и $y^{(1)}$	$x^{(0)}, x^{(1)}, y^{(0)}$ и $y^{(1)}$
Найти:	$x^{(1)}$	факторные влияния

Объединение этих двух методов позволит эффективно управлять значениями результирующих факторов ($x^{(1)}$), поскольку с помощью МОВ можно подобрать их таким образом, чтобы получить необходимый уровень результирующего показателя ($y^{(1)}$), что служит предпосылкой проведения АКИ. Такой синтез этих двух методов тем более актуален, поскольку позволит гибко управлять исследуемой социально-экономической системой и повысить влияние управляемой системы на процесс управления.

Алгоритм управления на основе синтеза МОВ и АКИ.

Дано: $x^{(0)}, f^{(0)}, f^{(1)}, k_{x_i}$ — коэффициенты относительной важности (КОВ) соответствующих факторов.

Найти: $x^{(1)}$, т. е. $\varphi(x_1), \dots, \varphi(x_n)$ — искомые результирующие значения факторов.

Задача: выполнить АКИ.

Алгоритм управления на основе МОВ и АКИ

Шаг 1. Начало МОВ. Сформировать целевую установку — определить направления изменений показателя и факторов.

Шаг 2. Зафиксировать значение $x_1^{(1)}$, выразить через него остальные параметры $x_i^{(1)}$ по формулам:

— для прямой связи вида $x_i^{(1)} = a_i x_1^{(1)} + b_i$;
 $a_i = k_{x_i}/k_{x_1}, b_i = x_i^{(0)} - a_i x_1^{(0)}$;

— для обратной связи вида $x_i^{(1)} = -a_i x_1^{(1)} + b_i$;
 $a_i = k_{x_i}/k_{x_1}, b_i = x_i^{(0)} + a_i x_1^{(0)}$.

Шаг 3. Подставить значение $x_1^{(1)}$ в исходную модель, решить ее относительно $x_1^{(1)}$.

Шаг 4. По найденному значению $x_1^{(1)}$ найти $x_i^{(1)}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Шаг 5. Найти приращения факторов $\varphi(x_i) = x_i^{(1)} - x_i^{(0)}$, $i = 2, 3, \dots, n$. Конец МОВ.

Шаг 6. Начало АКИ. Выразить приращение функции через приращение ее аргументов по од-

ной из теорем о среднем и решить полученное уравнение относительно параметра промежуточной точки.

Шаг 7. По найденному параметру найти факторные нагрузки и факторные влияния.

Шаг 8. Провести анализ найденных факторных влияний, проинтерпретировать результаты. Конец АКИ.

Здесь коэффициенты k_{x_i} показывают, в какой мере мы можем изменять аргументы исходной функции, т. е. отношение абсолютного приращения каждого фактора к сумме абсолютных приращений всех факторов [1—4].

Продemonстрируем работу этого алгоритма на конкретном примере, причем для расчета средних точек и факторных влияний будем пользоваться формулами (2) и (3) и сравним результаты.

2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Рассмотрим модель, описывающую рейтинг подразделения (кафедры) организации высшего образования, на котором задействованы три преподавателя категории «Ассистент» и три преподавателя категории «Доцент», а их работа оценивается по трем показателям результативности. Есть значения показателей $x^{(0)}$ (плановые), которые преподаватель выполнил в предшествующем периоде, и фактические значения, т. е. результативность за текущий период ($x^{(1)}$), которые необходимо подобрать таким образом, чтобы добиться нужного значения рейтинга кафедры. Найденные фактические значения необходимо проанализировать и оценить вклад изменения рейтинга каждого преподавателя (f_j , j — идентификатор преподавателя, $j = 2, 3, 4$) в изменение рейтинга подразделения:

$$f_j = \sum_{i=1}^3 \frac{x_{j+1,i}}{x_{1,i}} = \frac{x_{j+1,1}}{x_{1,1}} + \frac{x_{j+1,2}}{x_{1,2}} + \frac{x_{j+1,3}}{x_{1,3}},$$

где $x_{1,i}$ — максимальное значение i -го показателя результативности в данной категории преподавателей, $i = 1, 2, 3$.

Рейтинг всего подразделения положим равным

$$p(f)^+ = \frac{x_{2,1}^+ + x_{3,1}^+ + x_{4,1}^+}{x_{1,1}^+} + \frac{x_{2,2}^+ + x_{3,2}^+ + x_{4,2}^+}{x_{1,2}^+} +$$

$$+ \frac{x_{2,3}^+ + x_{3,3}^+ + x_{4,3}^+}{x_{1,3}^+} + \frac{y_{2,1}^+ + y_{3,1}^+ + y_{4,1}^+}{y_{1,1}^+} +$$

$$+ \frac{y_{2,2}^+ + y_{3,2}^+ + y_{4,2}^+}{y_{1,2}^+} + \frac{y_{2,3}^+ + y_{3,3}^+ + y_{4,3}^+}{y_{1,3}^+},$$

Таблица 1

Исходные данные

Ассистенты	Асс1	Асс2	Асс3	Макс. значение
Показатель	$x_{2,i}$	$x_{3,i}$	$x_{4,i}$	$x_{1,i}$
$i = 1$	1,3	3	3,2	4
$i = 2$	1,5	1,2	2,4	2,9
$i = 3$	2	0,3	2	5,2
Доценты	Доц1	Доц2	Доц3	Макс. значение
Показатель	$y_{2,i}$	$y_{3,i}$	$y_{4,i}$	$y_{1,i}$
$i = 1$	0	5	2,8	5,6
$i = 2$	2	2	2,5	5
$i = 3$	4,5	3,7	3	6

где $x_{j,i}$ — показатели ассистентов, $y_{j,i}$ — показатели доцентов ($j = 2, \dots, 4; i = 1, 2, 3$). В этой формуле в соответствии с шагом 1 алгоритма отражена целевая установка — повысить рейтинг кафедры на определенный уровень путем соответствующего изменения показателей.

В табл. 1 приведены плановые значения результативности работы профессорско-преподавательского состава, в табл. 2 заданы КОВ. Фактическое значение рейтинга подразделения равно 9,1719032, а плановое 9,020067577. Необходимо найти фактические значения всех показателей результативности сотрудников кафедры, при которых будет достигнуто желаемое значение рейтинга, т. е. он повысится на 0,151835623.

Зафиксируем показатель $x_{1,1}^{(1)}$, как на шаге 2 алгоритма, и выразим остальные через него. Видно, что между ним и остальными факторами связь прямая. Например, фактор $x_{1,2}^{(1)}$ по формулам из шага 2 примет вид: $x_{1,2}^{(1)} = x_{1,1}^{(1)} - 1,1$. Остальные факторы определяются аналогично. Согласно шагу 3, подставим их в исходную модель для нахождения

фактических значений переменных. После упрощения получим уравнение:

$$9,1719032 = \frac{26x_{1,1}^{(1)} - 96,5}{x_{1,1}^{(1)}} + \frac{26x_{1,1}^{(1)} - 98,9}{x_{1,1}^{(1)} - 1,1} + \\ + \frac{26x_{1,1}^{(1)} - 99,7}{x_{1,1}^{(1)} + 1,2} + \frac{34x_{1,1}^{(1)} - 128,2}{1,6x_{1,1}^{(1)} - 0,8} + \\ + \frac{34x_{1,1}^{(1)} - 129,5}{1,6x_{1,1}^{(1)} - 1,4} + \frac{34x_{1,1}^{(1)} - 124,8}{1,8x_{1,1}^{(1)} - 1,2}.$$

Это уравнение шестой степени. Решение, удовлетворяющее условию задачи, $x_{1,1}^{(1)} = 4,004176864$. Остальные фактические значения факторов (шаг 4) и их приращения ϕ (шаг 5) представлены в табл. 3.

По полученным данным найдем наиболее важные показатели работы сотрудников, т. е. такие, изменение которых больше всего повлияло на изменение результирующей функции — рейтинга кафедры. Для этого найдем параметр средней точки τ с помощью второй теоремы о среднем. Его значение можно найти по формуле, полученной из выражения (3):

$$\tau = \frac{\Delta f - \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})}{\partial x_i} \Delta x_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(x_1^{(0)}, \dots, x_n^{(0)})}{\partial x_i} - \frac{\partial f(x_1^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})}{\partial x_i} \right) \Delta x_i} = \\ = 0,499699477.$$

Теперь найдем факторные влияния каждого показателя (A_{x_i} из формулы (3)), они представлены в табл. 4.

Очевидно, наибольшие факторные влияния имеют факторы $x_{3,2}$, $x_{2,2}$, $y_{3,2}$, $x_{3,1}$ и $y_{3,1}$. Это означает, что в большей мере повысить рейтинг кафедры можно путем изменения именно этих показателей.

Рассчитаем соответствующие факторные влияния по сотрудникам, чтобы определить, кто из сотрудников внесет наибольший вклад в рейтинг ка-

Таблица 2

Коэффициенты относительной важности

Показатель	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	$x_{2,3}$	$x_{3,1}$	$x_{3,2}$	$x_{3,3}$	$x_{4,1}$	$x_{4,2}$	$x_{4,3}$
КОВ	0,005	0,005	0,005	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,03	0,03	0,03
Показатель	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,3}$	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	$y_{2,3}$	$y_{3,1}$	$y_{3,2}$	$y_{3,3}$	$y_{4,1}$	$y_{4,2}$	$y_{4,3}$
КОВ	0,008	0,008	0,009	0,05	0,05	0,05	0,08	0,08	0,08	0,04	0,04	0,04

Таблица 3

Результаты метода обратных вычислений

Показатель	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	$x_{2,3}$
Факт	4,00418	2,90418	5,20418	1,33341	1,53341	2,03341
Показатель	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,3}$	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	$y_{2,3}$
Факт	5,60668	5,00668	6,00752	0,04177	2,04177	4,54177
Показатель	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	$x_{2,3}$
$\varphi(x_{i,j})$	0,00418	0,00418	0,00418	0,03341	0,03341	0,03341
Показатель	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,3}$	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	$y_{2,3}$
$\varphi(y_{i,j})$	0,00668	0,00668	0,00752	0,04177	0,04177	0,04177
Показатель	$x_{3,1}$	$x_{3,2}$	$x_{3,3}$	$x_{4,1}$	$x_{4,2}$	$x_{4,3}$
Факт	3,05012	1,25012	0,35012	3,22506	2,42506	2,02506
Показатель	$y_{3,1}$	$y_{3,2}$	$y_{3,3}$	$y_{4,1}$	$y_{4,2}$	$y_{4,3}$
Факт	5,06683	2,06683	3,76683	2,83341	2,53341	3,03341
Показатель	$x_{3,1}$	$x_{3,2}$	$x_{3,3}$	$x_{4,1}$	$x_{4,2}$	$x_{4,3}$
$\varphi(x_{i,j})$	0,05012	0,05012	0,05012	0,02506	0,02506	0,02506
Показатель	$y_{3,1}$	$y_{3,2}$	$y_{3,3}$	$y_{4,1}$	$y_{4,2}$	$y_{4,3}$
$\varphi(y_{i,j})$	0,06683	0,06683	0,06683	0,03341	0,03341	0,03341

Таблица 4

Факторные влияния показателей результативности

Показатель	$x_{1,1}$	$x_{1,2}$	$x_{1,3}$	$x_{2,1}$	$x_{2,2}$	$x_{2,3}$
Влияние	-0,00184	-0,00238	-0,00063	0,009722	0,013407	0,00748
Показатель	$y_{1,1}$	$y_{1,2}$	$y_{1,3}$	$y_{2,1}$	$y_{2,2}$	$y_{2,3}$
Влияние	-0,00156	-0,00163	-0,00219	0,008332	0,009332	0,007777
Показатель	$x_{3,1}$	$x_{3,2}$	$x_{3,3}$	$x_{4,1}$	$x_{4,2}$	$x_{4,3}$
Влияние	0,011666	0,016088	0,008975	0,005832	0,008042	0,004487
Показатель	$y_{3,1}$	$y_{3,2}$	$y_{3,3}$	$y_{4,1}$	$y_{4,2}$	$y_{4,3}$
Влияние	0,011111	0,012444	0,01037	0,005556	0,006222	0,005185

федры. Результаты представлены в табл. 5. Для сравнения, в третьей колонке табл. 5 представлены факторные влияния, рассчитанные с помощью формулы (2). Как видно, результаты расчета факторных влияний совпали.

Из факторных влияний видно, что нагрузку на преподавателей можно регулировать путем изменения КОВ. Если сравнить КОВ в табл. 2 с результатами факторных влияний в табл. 5, можно увидеть, что КОВ у Асс2 и Доц2 выше, чем у других преподавателей соответствующей категории и их факторные влияния тоже выше. Таким образом,

Таблица 5

Факторные влияния сотрудников

Преподаватель	По формуле (3)	По формуле (2)
Асс1	0,026287	0,026283
Асс2	0,03943	0,039428
Асс3	0,019715	0,019714
Доц1	0,022759	0,02276
Доц2	0,036415	0,036415
Доц3	0,018208	0,018205

МОВ позволяет распределять результативность между преподавателями в соответствии с их нагрузкой. Один из практических выводов мог бы состоять в том, что те преподаватели, у которых много учебных часов, могли бы нагружаться при необходимости меньше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный численный алгоритм решения обратных задач в связи с анализом конечных изменений, а также метод нахождения средней точки и факторных нагрузок на основе второй теоремы о среднем, могут быть применены в системах управления социальными и экономическими системами. Комбинация метода обратных вычислений и анализа конечных изменений позволяет гибко управлять процессами в социально-экономических системах. Сравнение работы методов нахождения средней точки и факторных нагрузок на основе второй теоремы о среднем и на основе теоремы Лагранжа, показало, что результаты совпадают, а простота нового метода очевидна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блюмин С.Л., Суханов В.Ф., Чеботарев С.В. Экономический факторный анализ. — Липецк: ЛЭГИ, 2004. — 148 с.
2. Блюмин С.Л., Боровкова Г.С. Лагранжев анализ конечных изменений: подход к формированию изменений // V всерос. науч.-практ. конф. «Математическое моделирование процессов и систем», приуроченная к 110-летию со дня

рожд. акад. А.Н. Тихонова, 17—19 нояб. 2016 г., Республика Башкортостан, г. Стерлитамак.

3. Блюмин С.Л., Боровкова Г.С. Некоторые варианты теоремы о среднем (педагогическая поддержка науч.-исслед. и творческой деятельности обучающихся и педагогов) // Интеграция методической (науч.-методич.) работы системы повышения квалификации кадров: материалы XVIII Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. — Ч. 1 / Междунар. академия наук пед. образования; Челяб. ин-т препод. и повыш. квал. работн. образования / отв. ред. Д.Ф. Ильясов. — М.; Челябинск: ЧИППКРО, 2017. — С. 167—170.
4. Боровкова Г.С. Особенности применения различных формулировок теоремы о среднем на примере производственной функции Кобба — Дугласа // Материалы XII междунар. науч.-практ. конф. «Современные сложные системы управления». — Липецк, 25—27 окт. 2017 г. — С. 53—57.
5. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. — Т. 2. — 864 с.
6. Wünsche A. Approach to a Proof of the Riemann Hypothesis by the Second Mean-Value Theorem of Calculus // Advances in Pure Mathematics. — 2016. — N 6. — P. 972—1021.
7. Грибанова Е.Б. Методы решения обратных задач экономического анализа // Корпоративные финансы. — 2016. — № 1. — С. 119—130.
8. Грибанова Е.Б. Решение обратных задач экономики с помощью модифицированного метода обратных вычислений // Проблемы управления. — 2016. — № 5. — С. 35—40.
9. Одинцов Б.Е. Обратные вычисления в формировании экономических решений. — М.: Финансы и статистика, 2004. — 256 с.

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

Блюмин Семен Львович — д-р физ.-мат. наук, профессор,
✉ sabl@lipetsk.ru,

Боровкова Галина Сергеевна — ассистент, ✉ haligh@mail.ru,
Липецкий государственный технический университет.



XIII Всероссийское совещание по проблемам управления, посвященное 80-летию Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

17—20 июня 2019 г., ИПУ РАН, г. Москва, Россия

Направления работы Совещания

- Теория систем управления
- Управление подвижными объектами и навигация
- Интеллектуальные системы в управлении
- Управление в промышленности и логистике
- Управление системами междисциплинарной природы
- Средства измерения, вычислений и контроля в управлении
- Системный анализ и принятие решений в задачах управления
- Информационные технологии в управлении
- Проблемы образования в области управления: современное содержание и технологии

Более подробная информация на сайте <http://vspu2019.ipu.ru>

ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ПОЛНОТЫ ПАТЕНТНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ФОНДОВ (НА ПРИМЕРЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ ПАТЕНТНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ)

В.О. Сиротюк

Сформулированы требования к структуре и полноте патентного информационного фонда. Дано определение показателя полноты фонда и предложены формализованные модели и методы ее анализа и оценки. Полученные результаты применены для оценки полноты и совершенствования баз данных патентного информационного фонда международной патентной организации — Евразийского патентного ведомства.

Ключевые слова: патентный информационный фонд, патентный поиск международного типа, базы данных патентной и непатентной информации, тематическая база данных, показатель полноты патентного информационного фонда, эталонная база данных патентной и непатентной информации.

ВВЕДЕНИЕ

Главная функция патентного ведомства заключается в проведении патентной экспертизы, в ходе которой заявка на изобретение оценивается на новизну, изобретательский уровень и промышленную применимость. Важное место в экспертизе заявок занимает патентный поиск, цель которого состоит в выявлении предшествующего уровня техники. Патентный поиск проводится на основании формулы изобретения с учетом описания и чертежей в объеме, соответствующем международным требованиям и правилам, предусмотренными Договором о патентной кооперации (РСТ) [1]. Патентный поиск должен охватывать максимально возможное число релевантных источников информации безотносительно к языку, на котором издан документ, срока давности и типа документа.

Эффективность и качество патентного поиска определяются, в первую очередь, полнотой ПИФ, который представляет собой совокупность классифицированной, структурированной и систематизированной по областям знаний (тематикам) патентной документации, непатентной литературы и патентно-ассоциированной документации, снаб-

женной справочно-поисковым аппаратом и инструментально-программными средствами доступа к данным и их обработки [2].

Принятые сокращения

БД — база данных
ВОИС — Всемирная организация интеллектуальной собственности
ЕАПАТИС — Евразийская патентно-информационная система
ЕАПВ — Евразийское патентное ведомство
ЕПВ — Европейское патентное ведомство
МПК — Международная патентная классификация
НПБД — БД непатентной литературы
ПБД — БД патентной документации
ПИФ — патентный информационный фонд
РСТ — Patent Cooperation Treaty
ТБД — тематическая БД
ТЭБД — тематическая эталонная БД
УДК — Универсальная десятичная классификация
ЦБИС — цифровая библиотека интеллектуальной собственности
ЭБД — эталонная БД

Патентное ведомство несет ответственность за полноту патентного поиска, поэтому при его проведении должно быть использовано максимально возможное число патентных документов соответствующих классификационных рубрик МПК, независимо от языка публикации документов и глубины их ретроспективы, научно-техническая (непатентная) литература, отобранная из внутренних и внешних источников.

Для проведения полноценного патентного поиска международного типа ведомству рекомендуется иметь в своем распоряжении или иметь доступ к патентной и непатентной документации, определенной в рамках договора РСТ, просмотр которой обязателен при рассмотрении заявок [1, 3]. Современные информационно-телекоммуникационные технологии и инфраструктуры, в том числе облачные, обеспечивают доступ к ПБД, выкладываемым патентными ведомствами в сети Интернет, как правило, на условиях бесплатного пользования. Кроме того, региональные и международные патентные организации (ВОИС, ЕАПВ, ЕПВ) предоставляют свободный доступ к своим информационно-поисковым системам Patentscop [3], ЕАПАТИС [4] и Espacenet [5] соответственно, содержащим ПБД региональной и национальной патентной документации. Активно разрабатываемые и внедряемые в информационных системах ведомств средства машинного перевода позволяют преодолеть также «языковой барьер» и делают «читаемыми» патентную документацию, представленную на разных языках.

Базы данных непатентной литературы, как правило, предоставляются за определенную плату. Источниками НПБД служат крупные издательства, библиотеки, научные и исследовательские центры и организации, занимающиеся оцифровкой хранящихся у них материалов и переводом их в электронную форму. Например, порталы научно-технической литературы такие, как Science Direct (<http://www.sciencedirect.com>), High Wire Press (<http://highwire.stanford.edu/lists/freetart.dtl>), American Chemical Society (<http://pubs.acs.org/about.html>), IEEE (<http://ieeexplore.ieee.org/browse/periodicals/title/>); сайты непатентной литературы в области химии Pharmaceutical Research (<http://www.springerlink.com/content/1573-904X/>), Chemistry Journals (University of Cambridge) (<http://www.ch.cam.ac.uk/c2k/cj>), ChemMedChem (<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jtoc/110485305/>), в области медицины — European Journal of Cancer (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/09598049>), Русский медицинский журнал (<http://rmj.ru>), American Journal of Hematology (<http://www3.interscience.wiley.com/cgi-bin/jhome/112621403>), в области физики — European Journal of Physics (<http://www.iop.org>), Health Physics (<http://www.health-physics.com>) и др.

Таким образом, в современных условиях для обеспечения проведения полноценных патентных поисков ПИФ патентного ведомства должен иметь распределенную информационно-управляющую структуру и содержать локальные (внутренние) БД патентной и непатентной информации ведомства, средства доступа к внешним распределенным патентно-информационным ресурсам, средства поиска и обработки данных, а также сервисные средства [2, 6]. Исходя из этого, полнота ПИФ определяется не только и не столько числом хранимых в локальных БД документов в электронной форме, но также структурой и составом образующих их информационных элементов, наличием, структурой и возможностью реализации путей доступа к требуемым при проведении патентных поисков внешним БД патентной и непатентной информации и реализованным в них сервисным средствам.

Отсутствие четкого определения полноты ПИФ, имеющего в современных условиях распределенную информационно-управляющую структуру, а также формализованных моделей и методов анализа и оценки показателя полноты ПИФ не позволяет ведомствам объективно оценивать свое состояние в области информационного обеспечения экспертизы, вырабатывать на этой основе стратегию и планы мероприятий по развитию информационно-технологической поддержки процессов проведения полноценных патентных поисков и принятия экспертами эффективных и качественных решений по патентоспособности заявок на изобретения.

Настоящая работа направлена на решение данной проблемы. В работе предложена единая методология анализа и оценки полноты ПИФ, охватывающая этапы анализа структур и содержания локальных баз данных ПИФ ведомства и доступных внешних БД, расчета численных значений показателя их полноты, анализа и оценки данных показателей, подготовки предложений и рекомендаций по повышению эффективности и качества информационных фондов, в том числе патентных. Предлагаемая методология базируется на комплексе разработанных формализованных моделей, методов и алгоритмов анализа и оценки структурной, функциональной, структурно-функциональной и информационной полноты фондов, а также методов и процедур построения канонических структур тематических БД патентной и непатентной информации, используемых для оценки полноты фондов.

1. ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРЕ ПАТЕНТНОЙ И НЕПАТЕНТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Рассмотрим общие требования, предъявляемые к структуре патентных документов, составляющих основу ПИФ.



Патентный документ в общем виде содержит следующие составные части: титульный лист, на котором приводятся библиографические данные, формула и/или реферат изобретения, а также, при наличии, основной чертеж; полный текст описания изобретения, оформленный в соответствии со стандартами ВОИС; графические материалы (чертежи, рисунки, схемы и т. п.); дополнительные материалы, например, отчет о результатах международного поиска по заявке, данные о правовом статусе патента, данные об изменениях и другие сведения. Отметим, что патентная документация достаточно хорошо и строго формализована. Существует ряд международных стандартов ВОИС на представление патентных документов, например, стандарт ST16 определяет допустимые коды видов документов, стандарт ST3 — средства для идентификации патентных ведомств или организаций, ST10/C — допустимые правила задания номеров приоритетных заявок и др. [7].

Структура описания непатентной документации в соответствии со стандартом ST14 ВОИС включает в себя:

- имя автора;
- название статьи, монографии;
- аннотацию (реферат);
- номер издания;
- место публикации и имя издателя;
- год публикации;
- полный текст описания.

Для классификации непатентной документации применяется УДК.

Патентно-ассоциированные документы в основном неструктурированные и содержат законодательные, нормативно-правовые и справочные сведения. По сути, эти документы не играют существенной роли при проведении патентных поисков и могут быть отнесены для упрощения дальнейшего изложения к одной из разновидностей непатентной документации.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ ПОЛНОТЫ ПАТЕНТНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ФОНДА

Введем определение полноты ПИФ.

Показатель полноты ПИФ характеризует соответствие состава, структуры, содержания, эксплуатационных и сервисных характеристик локальных (внутренних) и внешних распределенных, доступных патентному ведомству, ПБД и НПБД спецификациям требований к составу и структурам данных, контенту, поисковым, сервисным и функциональным требованиям эталонных БД фондов патентной документации и непатентной литературы.

В дальнейшем для удобства изложения под базами данных ПИФ будем понимать как ПБД, так

и НПБД, а под ЭБД — эталонные ПБД и эталонные НПБД.

Составляющими элементами показателя полноты ПИФ служат структурная, функциональная, структурно-функциональная и информационная полнота ПИФ. Введем их определения.

Структурная полнота определяется отношением числа входящих в базы данных ПИФ с учетом классификационных индексов МПК структурных элементов (объектов данных и информационных элементов), связей между элементами и путей доступа к ним, в том числе виртуальных, реализуемых посредством организации доступа к внешним распределенным БД патентной и непатентной документации, к их общему числу, зафиксированному в ЭБД. Оценка данного показателя характеризует полноту информационного фонда «вширь». Отсутствие каких-либо информационных элементов, например, данных о приоритете заявки, номера международной публикации и др., а также отдельных частей документов в структуре БД, например, реферата или полного описания заявки (патента) делает невозможным проведение полноценных патентных поисков, а также получение полной и достоверной информации о найденных документах. Это не позволяет экспертам принимать качественные решения относительно патентоспособности заявок на изобретения. Структурная полнота является интегральным показателем полноты по элементам (элементной полноты) и полноты по связям (отношениям) между элементами.

Функциональная полнота определяется отношением числа методов и процедур поиска данных (включая средства нумерационного, именного, тематического поиска), обработки баз данных ПИФ (пополнения, обновления, контроля, верификации и др.), удаленного доступа к внешним источникам патентной и непатентной информации и метапоиска в них, машинного перевода, наглядного визуального отображения документов, и других сервисных процедур к их общему числу, реализованному в ЭБД. Данный показатель позволяет оценить технологическую оснащенность и функциональные возможности баз данных ПИФ в распределенной информационно-управляющей инфраструктуре ПИФ.

Структурно-функциональная полнота определяется отношением числа классифицированных в соответствии с МПК объектов данных, информационных элементов, связей и путей доступа, а также процедур и методов доступа, поиска, обработки, отображения данных и сервисных процедур, реализованных на сформированной информационно-управляющей структуре ПИФ, к их общему числу в ЭБД. Данный показатель является интегральным показателем структурной и функциональной полноты ПИФ.

Информационная полнота характеризует отношение числа хранимых в локальных базах данных ПИФ ведомства и в доступных внешних БД документов к их общему числу, определенному в ЭБД. Показатель информационной полноты характеризует полноту ПИФ «вглубь», т. е. по числу хранимых в базах данных ПИФ документов (записей). Его оценка важна в смысле числа находимых при реализации поисковых запросов патентных и непатентных документов. Например, требованиями к минимуму документации РСТ установлена глубина ретроспективы для патентной документации СССР с 1924 г., для патентной документации России с 1991 г., для патентной документации ВОИС и ЕПВ с 1978 г. и т. д. [3, 4].

3. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМОЙ МЕТОДОЛОГИИ АНАЛИЗА И ОЦЕНКИ ПОЛНОТЫ ПАТЕНТНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ФОНДА

Разработанная методология анализа и оценки полноты ПИФ базируется на комплексе формализованных моделей, методов и алгоритмов анализа и оценки структурной, функциональной, структурно-функциональной и информационной полноты фондов, а также методов и процедур построения канонических структур ТБД патентной и непатентной информации, используемых для оценки полноты фондов. Разработанные модели, методы и алгоритмы обеспечивают:

- построение (или формализацию существующих) канонических структур ЭБД и баз данных ПИФ;
- анализ общности (сходства) канонических структур баз данных ПИФ и ЭБД;
- расчет численных значений составляющих показателя полноты ПИФ;
- анализ и оценку составляющих показателей;
- определение общего показателя полноты ПИФ;
- подготовку предложений и рекомендаций по повышению эффективности и качества баз данных ПИФ.

Оценка структурной и функциональной, а также структурно-функциональной полноты ПИФ осуществляется с помощью методов анализа общности (сходства) канонических структур баз данных ПИФ и ЭБД, формируемых на этапе концептуального проектирования БД [8, 9]. Как известно, на данном этапе создается независимая от системы управления базой данных и среды реализации безыбыточная структура данных, наиболее полно и адекватно описывающая свойства и характеристики предметной области пользователей БД. Проектирование БД на других уровнях представления (логическом, физическом) связано, как правило, с введением некоторой избыточности по данным

и связям с целью возможности их реализации в выбранной среде [9]. Поэтому определение структурной и функциональной, а также структурно-функциональной полноты ПИФ целесообразно осуществлять на уровне концептуального представления данных.

Разработанные методы анализа общности основаны на оценке функций подобия спецификаций структурных и функциональных требований к ЭБД и базам данных ПИФ путем их сравнения. Они обеспечивают оценку структурной и функциональной полноты ПИФ путем вычисления функций подобия баз данных ПИФ и ЭБД по хранящимся в них объектам данных, информационным элементам, связям и процедурам поиска и обработки данных, а также структурно-функциональной полноты ПИФ. Информационная полнота ПИФ рассчитывается как отношение количественных характеристик (экземпляров) классов, объектов данных и информационных элементов, зафиксированных в локальных и доступных внешних базах данных ПИФ, к количественным характеристикам ЭБД.

В целях сокращения размерности решаемых задач, а также возможности применения разработанной методологии, моделей, методов и алгоритмов для оценки полноты информационных фондов другого назначения (например, библиотек, научных и исследовательских организаций, архивов и др.), предложены методы построения канонических структур ТЭБД и ТБД патентного информационного фонда, создаваемых для определенных областей знаний, например, для отдельных классификационных рубрик МПК и связанных с ними таблицами соответствия индексов УДК. В качестве тематических предметных областей могут выступать, например, документы и информация, относящиеся к разделам МПК «А. Удовлетворение жизненных потребностей человека» или «С. Химия, металлургия», или «Н. Электричество», или к более дробным внутри разделов классам, подклассам, рубрикам и связанным с ними таблицами соответствия непатентные документы и информация из разделов УДК, например, «0. Общий раздел», «3. общественные науки», «5. Математика. Естественные науки» соответственно. Формируемые для этих предметных областей ТБД могут быть определены как специальным образом отобранные для решения определенной научной или прикладной проблемы (в том числе для определения предшествующего уровня техники) из патентных и непатентных первоисточников и организованные коллекции тематических связанных данных (патентных и непатентных).

Для построения канонической структуры ТЭБД применяются методы объектно-ориентированного анализа и проектирования БД, так как они наибо-



лее адекватно отражают технологию формирования и хранения ТЭБД в распределенной информационно-управляющей структуре и предоставляемых ТЭБД услуг. С этой целью модифицированы и развиты методы объектно-ориентированного анализа и проектирования БД [9, 10], учитывающие особенности предметной области ТЭБД, в частности, как отмечалось выше, требования и рекомендации стандартов ВОИС и цифровых библиотек интеллектуальной собственности, а также экспертов, проводящих патентные поиски международного типа. В результате их применения формируется объектная каноническая структура ТЭБД.

Канонические структуры ТБД строятся с помощью методов и процедур (структурных или объектно-ориентированных), рассмотренных в работах [8, 9].

Канонические структуры находящихся в эксплуатации (функционирующих) ЭБД и баз данных ПИФ известны из их описания в технической документации на БД. Для расчета численных значений составляющих показателя полноты ПИФ согласно предложенной методологии требуется их представление в формализованном виде согласно методикам, приведенным в работах [8, 9].

На завершающем этапе предложенной методологии на основе полученных количественных значений оценок показателей полноты баз данных ПИФ (структурной, функциональной, структурно-функциональной и информационной) патентным ведомством разрабатываются планы мероприятий по совершенствованию и развитию конкретных БД (их состава, структуры, технологического и инструментально-программного окружения), что позволяет в целом повысить эффективность и качество ПИФ.

4. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ И ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ КАНОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР ТЕМАТИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ

Рассмотрим особенности построения эталонных БД. Эталонные БД разрабатываются на основе общих и специальных требований, предъявляемых стандартами ВОИС к составу, содержанию и структуре патентной документации и непатентной литературы, требований и рекомендаций к поисковому, сервисному и эксплуатационным характеристикам доступа к данным и их использования, предъявляемых к современным цифровым библиотекам интеллектуальной собственности (или IPDL — Intellectual Property Digital Library) [3], а также информационных и функциональных требований, предъявляемых к проведению экспертами патентных поисков международного типа. В качестве ЭБД патентной документации могут служить ПБД либо источника информации (патентная БД

национального патентного ведомства, например, ПБД USPTO или ПБД JPO, или ПБД Роспатента и др.), либо ПБД всемирных патентных информационных систем типа Patentscope или Espacenet [3, 5], содержащих коллекцию ПБД стран, входящих в минимум документации РСТ. В качестве ЭБД непатентной литературы могут служить НПБД порталов или сайтов непатентной литературы, рассмотренные выше. Рабочее место эксперта, проводящего патентные поиски международного типа в ЭБД, оснащается современным инструментарием для доступа к данным и обработки патентной и непатентной документации, сервисными средствами работы с ней, включая машинный перевод.

Построение объектной канонической структуры ТЭБД осуществляется в четыре этапа [9, 10].

На *первом этапе* формируется объектная модель предметной области ТЭБД, формализованно описываемой системой множеств и булевых матриц смежности между компонентами предметной области. Описание предметной области ТЭБД включает в себя:

- пользователей ТЭБД, к которым относятся специалисты — эксперты, проводящие патентные поиски международного типа по определенным областям знаний (тематикам), и сотрудники служб администраторов БД патентной и непатентной документации, отвечающие за создание, сопровождение и администрирование ТЭБД, предоставление доступа к данным и сервисам;
- объекты данных и их характеристики;
- информационные элементы и их характеристики;
- процедуры поиска и обработки данных, последовательность их выполнения и характеристики, включая процедуры виртуального доступа к данным внешних источников и метапоиска в них, а также средства машинного перевода и другие сервисные операции и процедуры;
- отношения между объектами данных, информационными элементами и процедурами поиска и обработки данных.

На *втором этапе* на основе сформированной объектной модели предметной области формируются модели спецификаций информационных и функциональных требований пользователей, представляемых, соответственно, в виде множества n -арных (в частном случае, бинарных) отношений между структурными элементами и элементами множества предикатов. Для предметной области ТЭБД, основу которой составляют патентные документы, имеющие формализованный, стандартизованный вид, характерно наличие в основном двуместных предикатов.

Полученные на первом и втором этапах результаты используются на *третьем этапе* для формирования объектных моделей требований пользова-

телей и обобщенной объектной структуры требований пользователей.

На *четвертом этапе* строится безызыбочная (минимальная) объектная каноническая структура ТЭБД путем сведения многообразия объектных моделей требований пользователей, зафиксированных в обобщенной объектной структуре пользователей ТЭБД, к базовым и специфическим классам объектов.

Для реализации процедур каждого этапа модифицированы и развиты с учетом особенностей предметной области ТЭБД модели и методы, рассмотренные в работах [9, 10]. В результате их выполнения формируется объектная каноническая структура ТЭБД, формализованно представляемая в виде графа $G_{к.с}^{об}(O, \Delta)$, вершинами которого $O = \{O_\varepsilon / \varepsilon = \overline{1, \varepsilon_0}\}$ служат классы и объекты данных предметной области, а дугами $\Delta = \{\delta_{\varepsilon\varepsilon'} / \varepsilon, \varepsilon' = \overline{1, \varepsilon_0}\}$ — связи (или отношения) между классами и объектами данных. Характеристиками графа $G_{к.с}^{об}$ являются интегральные характеристики классов (объектов) и связей между ними. При этом свойства класса (объекта) определяются включенными в его состав агрегатами (группами) данных и информационными элементами, а поведение — методами (функциями) поиска и обработки данных, среди которых выделено подмножество интерфейсных и подмножество реализационных процедур. Каждый класс O_ε формально описывается множеством информационных элементов $D_\varepsilon = \{d_l^\varepsilon\}$, матрицей смежности информационных элементов $B_\varepsilon = \|b_{ll'}^\varepsilon\|$, множеством процедур поиска и обработки данных $P_\varepsilon = \{p_r^\varepsilon\}$ и матрицей технологии обработки информационных элементов $W_\varepsilon = \|w_{rl}^\varepsilon\|$.

Рассмотрим особенности формирования ТБД.

Как отмечалось ранее, ТБД представляет собой коллекцию (подборку) отобранных из разных источников (ПБД и НПБД) патентных и непатентных документов определенной (заданной) тематики. Она формируется в результате проведения тематических поисков в базах данных ПИФ с помощью индексов МПК, УДК и ключевых слов (выражений), связываемых в запросе посредством логических функций (И/ИЛИ/НЕТ и др.). Учитывая, что характеристики баз данных ПИФ, как правило, разные и зависят от используемой при их создании информации (состава и структуры файлов и массивов данных, получаемых патентным ведомством по обмену из других организаций и патентных ведомств), то и отбираемые в ТБД из этих БД данные имеют разный состав, структуру и характеристики. Поэтому ТБД на физическом

уровне можно представить в виде мультисписка, состоящего из разделов, число которых соответствует числу используемых в тематическом запросе баз данных ПИФ. При этом каждый раздел содержит записи определенной структуры и содержания, соответствующей структуре той базе данных ПИФ, из которой они были отобраны, и содержит информацию о найденных тематически связанных патентных и/или непатентных документах.

Единая интегрированная каноническая структура ТБД строится путем объединения канонических структур баз данных ПИФ с помощью предложенных в работе [8] методов и процедур. В дальнейшем данная структура используется для определения только одной составляющей показателя полноты ПИФ — информационной полноты ПИФ. Использование единой канонической структуры ТБД для оценки других показателей полноты ПИФ (структурной и функциональной) невозможно из-за различий, как было отмечено выше, в структурах данных. Так, например, если структура одной из баз данных ПИФ является подмножеством структуры другой БД, что характерно для тех БД, которые не в полной мере удовлетворяют требованиям ВОИС и ЦБИС, то при их объединении в каноническую структуру ТБД первая структура «поглощается» второй и создается ложное представление, что структурная полнота этой БД достаточна и не требуются дальнейшие действия по ее совершенствованию. Поэтому структурная, функциональная и структурно-функциональная полнота ТБД рассчитываются отдельно для каждой базы данных ПИФ, используемой при формировании ТБД, путем попарного сравнения и анализа канонических структур ТЭБД и баз данных ПИФ. Это позволяет в дальнейшем разработать мероприятия по совершенствованию и развитию каждой базы данных ПИФ в отдельности и тем самым повысить полноту ПИФ в целом. В частном случае, при проведении патентных исследований по заданной тематике по фонду патентной документации только одной страны (например, России или Германии, или США и др.) формируется одна ТБД.

Для построения канонической структуры баз данных ПИФ могут применяться методы и процедуры (структурные или объектно-ориентированные), рассмотренные в работах [8, 9]. Дополнительная особенность применения данных процедур состоит в возможности их применения для построения баз данных ПИФ, характеризующихся содержанием разнородной мультимедийной информации из патентных и непатентных источников.

Обозначим $S = \{s_k\}$, $k = \overline{1, K_0}$ — множество локальных баз данных ПИФ. Каноническая структура k -й БД представляется в виде графа $G_k(D, U)$, где $D = \{d_l\}$, $l = \overline{1, L}$ — полное множество структурных



элементов, $D = D^{об} \cup D^{зн}$, где $D^{об} = \{d_l\}$, $l \in L_{об}$ — подмножество объектов (групп) данных, $D^{зн} = \{d_l\}$, $l \in L_{зн}$, — подмножество информационных элементов (ключей и атрибутов объектов (групп) данных), $L = L_{об} \cup L_{зн}$; $F = \{f_r\}$, $r \in \overline{1, R}$, — множество процедур поиска и обработки данных, доступа к внешним БД, машинного перевода, метапоиска и других сервисных процедур; $U = U_1 \cup U_2 \cup U_3$ — полное множество взаимосвязей между структурными элементами, где $U_1 = \{d_l, d_{l'}\}$, $l, l' \in L_{об}$ — множество взаимосвязей между объектами (группами) данных, $U_2 = \{d_l, d_{l'}\}$, $l, l' \in L_{зн}$ — множество взаимосвязей между ключами и атрибутами объектов (групп) данных, $U_3 = \{f_r, d_l\}$, $l \in L_{зн}$, $r \in \overline{1, R}$ — множество взаимосвязей между процедурами поиска и обработки данных и используемыми ими информационными элементами. Для каждого объекта (группы) данных определен состав образующих его информационных элементов (ключей и атрибутов) $H_l^{об} = \{d_l\}$ и процедур (методов) поиска и обработки данных $H_l^{зн} = \{f_r\}$.

Тематическую базу данных ПИФ, формируемую в результате выполнения тематического поискового запроса к базам данных ПИФ, формализованно представим в виде мультисписка (множества) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k, \dots, t_{K_0}\}$, где t_k — раздел ТБД, содержащий записи k -й базы данных ПИФ, отображенные в соответствии с классификационными индексами МПК и УДК.

5. ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛНОТЫ ТЕМАТИЧЕСКИХ БАЗ ДАННЫХ

Оценка полноты ТБД патентной документации и непатентной литературы ПИФ патентного ведомства осуществляется с помощью разработанных методов анализа общности канонических структур баз данных ПИФ, используемых для формирования ТБД и ТЭБД. Эти методы основаны на оценке функций подобия спецификаций структурных, функциональных и информационных требований к ТЭБД и базам данных ПИФ путем их сравнения и вычисления соответствующих значений показателя полноты ТБД.

Разработанные методы обеспечивают определение элементной полноты, полноты по связям (отношениям), структурной полноты, функциональной полноты и структурно-функциональной полноты баз данных, а также информационной полноты ТБД.

Для определения полноты баз данных ПИФ по информационному составу (элементной полноты) определим числа:

— общих в множествах O и D структурных элементов (объектов (групп) данных, информационных элементов): $p_{11} = |O \cap D|$;

— структурных элементов, присутствующих в множестве O , но отсутствующих в множестве D : $p_{10} = |O| - p_{11}$;

— структурных элементов, присутствующих в множестве D , но отсутствующих в множестве O : $p_{01} = |D| - p_{11}$.

Для оценки элементной полноты баз данных ПИФ с учетом особенностей рассматриваемых множеств может быть применен нормированный показатель подобия, предложенный в работах [9, 10] и вычисляемый по формуле:

$$\varepsilon_{зн} = \frac{1}{2} \left(\frac{p_{11}}{p_{11} + p_{10}} + \frac{p_{11}}{p_{11} + p_{01}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{p_{11}}{|O|} + \frac{p_{11}}{|D|} \right) = \frac{\alpha + \beta}{2}. \quad (1)$$

Показатель $\varepsilon_{зн}$:

— учитывает взаимную меру общности элементов множеств O и D и принимает значения $0 \leq \varepsilon_{зн} \leq 1$;

— монотонно возрастает с увеличением числа p_{11} .

Нормированный показатель подобия принимает максимальное значение ($\varepsilon_{зн} = 1$), когда информационные составы сравниваемых БД (базы данных ПИФ и ТЭБД) полностью совпадают. При $\varepsilon_{зн} = 0$ сравниваемые информационные структуры не имеют ни одного общего элемента.

Далее определим степень общности БД и ТЭБД по взаимосвязям между структурными элементами. Поскольку общие взаимосвязи между элементами структур $G_{к.с}^{об}(O, \Delta)$ и $G_k(D, U)$ могут существовать только между элементами множества пересечения $D_{ко} = O \cap D$, анализ общности структур взаимосвязей проводится на множестве элементов $D_{ко}$. При этом разработанные процедуры анализа позволяют учитывать не только наличие общих дуг (отношений) между парами структурных элементов множества $D_{ко}$, но и наличие общих путей доступа между элементами.

Данный анализ проводится для ограниченного (зафиксированного) множества элементов, не превышающего мощности множества элементов структуры $G_{к.с}^{об}(O, \Delta)$. Поэтому для оценки полноты баз данных ПИФ по связям (отношениям) между структурными элементами будем пользоваться мерой подобия, вычисляемой с помощью показателя Жаккарда:

$$\varepsilon_{св} = \frac{p_{11}}{p_{11} + p_{10} + p_{01}}. \quad (2)$$

Числа p_{11} , p_{10} , p_{01} , входящие в выражение (2), вычисляются, исходя из специфики рассматриваемой задачи анализа с учетом наличия общих взаимосвязей и (или) путей доступа между элементами множества D_{ko} , следующим образом:

$$p_{11} = \sum_i |F(d_i) \cap F(d_{i'})|; \quad p_{10} = \sum_i |F(d_i)| - p_{11};$$

$$p_{01} = \sum_i |F(d_{i'})| - p_{11}, \quad \forall d_i, d_{i'} \in D_{ko},$$

где $F(d_i) = \{d_j\}$, $F(d_{i'}) = \{d_{j'}\}$ — множества достижимости, соответственно, для элементов $d_i \in O$ и $d_{i'} \in D$ ($d_i, d_{i'} \in D_{ko}$).

Анализ выражения (2) показывает, что показатель подобия ε_{cb} принимает значения в интервале $0 \leq \varepsilon_{cb} \leq 1$. При $\varepsilon_{cb} = 0$ анализируемые структуры баз данных ПИФ и ТЭБД не имеют общих взаимосвязей или путей доступа, а $\varepsilon_{cb} = 1$ означает тождественность структур БД по их взаимосвязям между элементами.

Исходя из полученных выражений для вычисления мер подобия (1) и (2) структурная полнота БД ПИФ $\varepsilon_{стр}$ определится как $\varepsilon_{стр} = \varepsilon_{эл} + \varepsilon_{cb}$.

Показатель структурной полноты $\varepsilon_{стр}$ принимает значения в интервале $0 \leq \varepsilon_{стр} \leq 2$. Максимальное значение, равное 2, показатель $\varepsilon_{стр}$ принимает, если структура баз данных ПИФ (по составу образующих ее элементов и связей между ними) полностью соответствует структуре ТЭБД по соответствующей тематике (области знаний).

Функциональную полноту баз данных ПИФ целесообразно оценивать с помощью показателя меры подобия Сокала и Мичинера, учитывающего число схожих элементов (процедур поиска, доступа и обработки данных) в канонических структурах баз данных ПИФ и ТЭБД:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{2P'_{11}}{2P'_{11} + P'_{10} + P'_{01}}, \quad (3)$$

где P'_{11} — число общих процедур (методов) в требованиях пользователей баз данных ПИФ и ТЭБД, P'_{10} — число процедур, присутствующих в требованиях пользователей ТЭБД, но отсутствующих в требованиях пользователей баз данных ПИФ; P'_{01} — число процедур, присутствующих в требованиях пользователей баз данных ПИФ, но отсутствующих в требованиях пользователей ТЭБД.

Анализ выражения (3) показывает, что показатель подобия $\varepsilon_{пр}$ принимает значения в интервале $0 \leq \varepsilon_{пр} \leq 1$. При $\varepsilon_{пр} = 0$ анализируемые структуры не имеют общих процедур обработки данных, а $\varepsilon_{пр} = 1$ означает тождественность набора процедур в сравниваемых структурах.

Интегрированный показатель структурно-функциональной полноты баз данных ПИФ ε вычисляется по формуле:

$$\varepsilon = \varepsilon_{стр} + \varepsilon_{пр} = \varepsilon_{эл} + \varepsilon_{cb} + \varepsilon_{пр}. \quad (4)$$

Интегрированный показатель подобия, вычисляемый по формуле (4), принимает максимальное значение $\varepsilon = 3$ в случае, когда структурная полнота и функциональная полнота баз данных ПИФ максимальны и тождественны полноте ТЭБД.

Для определения информационной полноты ТБД, характеризуемой числом отобранных из баз данных ПИФ в ТБД документов заданной тематики, введем следующие параметры и характеристики тематических поисковых запросов, реализуемых на канонических структурах ТЭБД и баз данных ПИФ.

Каждый тематический поисковый запрос $q_\mu \in Q$,

где $Q = \{q_\mu / \mu = \overline{1, \mu_0}\}$ — множество тематических запросов, формализовано описывается поисковым предписанием π_k . Поисковое предписание π_k задается в виде множества пар $\{(d_i = d_i^{3H})R(d_{i'} = d_{i'}^{3H})\}$ («поисковый признак = значение» R «поисковый признак = значение»), где $d_i, d_{i'} \in D^{3H}$ — множество информационных элементов, R — логическая операция (AND/OR/NOT и др.), например, МПК = G01N3/32 AND KW (ключевое слово) = материал. При поиске в ТЭБД тематический запрос адресуется во все БД патентной документации стран, входящих в минимум документации РСТ, и во все БД непатентной литературы, определенные списком ВОИС.

Число документов (записей, экземпляров объектов данных), находимых в результате реализации множества тематических запросов $Q = \{q_\mu\}$, $\mu = \overline{1, \mu_0}$ на графе объектной канонической структуры ТЭБД $G_{к.с}^{об}(O, \Delta)$, формализовано представим в виде множества $W_\mu = \{w_\mu\}$, $\mu = \overline{1, \mu_0}$, где w_μ — число документов (экземпляров объектов), находимых в БД стран минимума РСТ и непатентной литературы по списку ВОИС при реализации μ -го тематического запроса.

Число документов (записей), находимых в результате реализации множества тематических запросов на графах канонических структур баз данных ПИФ $G_k(D, U)$, $k = \overline{1, K_0}$ формализовано представим в виде множества $V_\mu = \{v_\mu^k\}$, $\mu = \overline{1, \mu_0}$, $k = \overline{1, K_0}$, где v_μ^k — число документов (экземпляров объектов), находимых в k -й базе данных ПИФ при реализации μ -го тематического запроса.



Тогда информационная полнота тематической базы данных ПИФ при реализации μ -го тематического запроса определится из выражения:

$$\varepsilon_{\text{инф}}^{\mu} = \frac{1}{w_{\mu}} \sum_{k=1}^{K_0} v_{\mu}^k.$$

Вычисляемые по приведенным выше формулам показатели элементной полноты, полноты по связям (отношениям), функциональной и информационной полноты являются относительными величинами и могут представляться в процентах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методология, модели и методы анализа и оценки полноты ПИФ применялись для формирования, совершенствования и развития евразийского патентного информационного пространства, создаваемого в рамках деятельности международной патентной организации — Евразийского патентного ведомства (ЕАПВ) [4]. На основе полученных количественных значений оценок показателей полноты баз данных ПИФ этого ведомства (структурной, функциональной, структурно-функциональной и информационной) разработаны и внедрены планы мероприятий по повышению их качества и эффективности. В результате их реализации ПИФ пополнился патентной документацией отдельных организаций и стран (Европейского патентного ведомства (ЕПВ), ВОИС, США, Японии, России, документацией стран Евразийской патентной конвенции, Украины, Узбекистана, Грузии). Структуры баз данных ЕПВ, ВОИС, России (а также СССР), стран СНГ дополнились рефератами. Расширены библиографические описания отдельных БД путем включения в них таких элементов, как, например, номер международной заявки, код вида документа, регистрационные номера приоритетных заявок и др. Поисковые средства информационной системы ЕАПВ (ЕАПАТИС) дополнились средствами виртуального доступа и метапоиском во внешних БД патентной документации и непатентной литературы, а также средствами машинного перевода. В настоящее время в ЕАПАТИС поддерживается более 25-ти постоянно пополняемых локальных тематических баз данных патентного информационного фонда ЕАПВ. Общий объем содержащейся в БД информации превышает 70 млн. документов [4].

Выполненные мероприятия позволили не только повысить эффективность и качество ПИФ, но и обеспечить возможность проведения в ЕАПВ полноценных патентных поисков международного типа по евразийским заявкам по ряду тематик, относящимся к компетенции отделов физики и

механики, а также по отдельным областям знаний (в частности, пищевая, сельскохозяйственная, медицинская биотехнология, лекарства и медикаменты для терапевтических, стоматологических или гигиенических целей, удобрения, смеси удобрений, ациклические и карбоциклические соединения; химические или физические процессы, аппараты для их проведения), относящимся к компетенции отдела химии и медицины Управления экспертизы ЕАПВ. При этом результаты поиска в тематических базах данных патентного информационного фонда ЕАПВ не уступают, а в ряде случаев превосходят результаты, содержащиеся в отчетах о поиске, представленных международными поисковыми органами.

Самостоятельное проведение патентных поисков по евразийским заявкам позволило значительно сократить расходы ЕАПВ по соответствующим статьям бюджета, повысить эффективность и качество принимаемых экспертами решений по заявкам, а также квалификацию экспертов.

Полученные результаты использовались при формировании и развитии евразийского патентного информационного пространства [4, 6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Patent Cooperation Treaty (PCT)*. — Geneva: WIPO, 2000.
2. Кульба В.В., Сиротюк В.О., Косяченко С.А. Информационная безопасность патентных ведомств: теория и практика. — М.: ИПУ РАН, 2017. — 166 с.
3. *Материалы сайта ВОИС*. — URL: www.wipo.int (дата обращения: 3.09.2018).
4. Фаязов Х.Ф., Сиротюк В.О., Овчинников А.В., Бурцев А.Б. Евразийская патентно-информационная система. — М.: ОАО ИНИЦ «Патент», 2006. — 108 с.
5. *Материалы сайта Европейской патентной организации*. — URL: www.epo.org (дата обращения: 3.09.2018).
6. Фаязов Х.Ф., Сиротюк В.О., Овчинников А.В., Бурцев А.Б. Формирование и развитие евразийского патентно-информационного пространства. — М.: ИНИЦ «Патент», 2010. — 124 с.
7. *Стандарты Всемирной организации интеллектуальной собственности*. — М.: ВНИИПИ, 1996.
8. Мамиконов А.Г., Ашимов А.А., Кульба В.В. и др. Оптимизация структур данных в АСУ. — М.: Наука, 1988. — 256 с.
9. Кульба В.В., Ковалевский С.С., Косяченко С.А., Сиротюк В.О. Теоретические основы проектирования оптимальных структур распределенных баз данных. Сер. «Информатизация России на пороге XXI века». — М.: СИНТЕГ, 1999. — 660 с.
10. Кульба В.В., Микрин Е.А., Сиротюк В.О., Сиротюк О.В. Модели и методы проектирования оптимальных структур объектно-ориентированных баз данных в автоматизированных информационно-управляющих системах. Научное издание. — М.: ИПУ РАН, 2005. — 103 с.

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

Сиротюк Владимир Олегович — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, vsirotyuk@ipu.ru.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОБОСНОВАНИЯ МЕСТ РАССТАНОВКИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ УЗЛОВ УПРАВЛЕНИЯ В КРУПНЫХ СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ¹

З.И. Шалагинова

Приведена математическая модель теплогидравлических режимов теплоснабжающей системы во времени с учетом транспортного запаздывания, а также возмущающих и управляющих воздействий. Разработаны интегрированные за расчетный период времени показатели степени обеспеченности потребителей, полученные на основе имитационного моделирования теплогидравлических режимов. Предложен подход к решению задачи расстановки промежуточных ступеней регулирования, основанный на построении матриц путей от конечных потребителей в направлении, обратном течению теплоносителя.

Ключевые слова: система теплоснабжения, многоуровневое моделирование, промежуточная ступень управления, показатель режимной управляемости, синтез, методика, алгоритм, расчет, информационно-вычислительный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Сложность задач управления и актуальность автоматизации процессов управления в российских ТСС объясняются их особенностями — они сложились как сложные, многосвязные, пространственно разнесенные иерархические объекты, функционирующие в условиях переменности их структуры, параметров и режимов работы при многочисленных внешних и внутренних возмущениях.

Работа ТСС характеризуется рядом важных особенностей, которые необходимо учитывать при решении задач автоматизации и управления:

- непрерывность процесса производства и потребления тепла;
- разнородность присоединенной нагрузки — отопление, ГВС, вентиляция, технологические нужды;

- неравномерность потребления тепла;
- режимная взаимозависимость от источников, работающих на общие тепловые сети;
- быстрота изменения гидравлических режимов и большое временное запаздывание по тракту температур.

Принятые сокращения

ГВС — горячее водоснабжение
ИВК — информационно-вычислительный комплекс
ИТ — источник тепла
ИТП — индивидуальный тепловой пункт
КРП — контрольно-распределительный пункт
МТС — магистральная тепловая сеть
РТС — распределительная тепловая сеть
ТГР — теплогидравлический режим
ТСС — теплоснабжающая система
ЦТП — центральный тепловой пункт

Основная задача автоматизации ТСС заключается в повышении управляемости в целях обеспечения всех категорий потребителей требуемым количеством тепла заданного качества в каждый момент времени, при соблюдении технологических

¹ Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.3 «Научно-методические основы интеллектуализации процессов развития и функционирования трубопроводных систем энергетики» (ИСЭМ СО РАН, рег. № AAAA-A17-117030310437-4).



ограничений на параметры теплоносителя и минимальных затратах. В общем случае эти затраты определяются такими составляющими:

- суммарный расход трудовых и материальных ресурсов на производство, транспорт и распределение тепловой энергии;
- ущерб от нарушения теплоснабжения потребителей и от низкого качества тепловой энергии;
- ущерб от повреждения оборудования, обусловленного отклонением параметров режима от допустимых значений.

В настоящее время отсутствует достаточно эффективная и простая методика оценки ущерба по перечисленным составляющим, а в отдельных случаях ущерб принципиально не могут быть определены (например, потеря трудоспособности людей: простудные заболевания из-за пониженных температур воздуха в отапливаемых помещениях или ожоги вследствие превышения температуры воды ГВС выше допустимой). В связи с этим задаче автоматизации будем придавать более узкий смысл — обеспечение потребителей тепловой энергией при минимальных затратах на ее производство, транспорт и распределение при соблюдении заданных требований по надежности и качеству теплоснабжения. Качество тепловой энергии характеризуется давлением и температурой теплоносителя, отпускаемого потребителям.

Проблема управляемости в ТСС связана с недостаточным уровнем проектирования, эксплуатации и технической оснащенности, особенно систем транспорта и распределения тепловой энергии. В силу исторического развития ТСС, в их структуру, как правило, не закладывалась четкая иерархия построения, в связи с чем существующие ТСС обладают лишь частичной управляемостью, т. е. обеспечивают требуемые параметры у отдельных потребителей в нормальных условиях и становятся плохо управляемыми при их нарушении.

1. ТРЕБОВАНИЯ К СТРУКТУРЕ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Разработкой принципов построения ТСС у нас в России начали заниматься еще в 1930-х гг. Первые предложения по рациональному построению тепловых сетей были сделаны в рамках разработки схемы теплофикации г. Москвы, когда предполагалось сооружение общего кольца для тепловых сетей в целях двустороннего снабжения потребителей тепловой энергией [1]. Согласно существующей сегодня российской концепции построения автоматизированных систем теплоснабжения с учетом надежности и управляемости [2], крупные ТСС с несколькими ИТ и протяженными заколь-

цованными тепловыми сетями с большим числом присоединенных разнородных потребителей для согласованной работы всех звеньев системы должны иметь несколько ступеней регулирования:

- на источниках тепла (ТЭЦ или котельных);
- в промежуточных узлах тепловой сети — КРП или ЦТП;
- в абонентских теплопотребляющих установках или в ИТП [2, 3].

При организации многоступенчатого регулирования каждая ступень облегчает работу последующей. Естественно, что для успешной работы ТСС по такой схеме необходима избыточность параметров на вводе в каждую из перечисленных ступеней управления.

В последнее время много говорят о несовершенстве принятой в России структуры ТСС с наличием ЦТП [2] в связи с большими потерями тепла и воды в распределительных сетях и низкой эффективностью установленного оборудования. И как это часто бывает, появляются призывы сломать существующую систему и вместо этого в каждом доме построить собственный тепловой пункт [4–6]. Несомненно, что системы теплоснабжения с ИТП имеют определенные преимущества по сравнению с ЦТП — это более тонкая регулировка теплового режима систем отопления, сокращение тепловых потерь и утечек воды в системах ГВС. Под ЦТП не надо отводить дорогостоящие городские земли, в этих системах отсутствуют распределительные сети ГВС, в них может быть упрощен учет энергоресурсов. Однако эти преимущества наиболее полно должны проявить себя в новом строительстве, при условии, что оборудование будет полностью установлено, отлажено, выведено на режим и затем грамотно эксплуатироваться.

Необходимо также помнить, что ни одна страна в мире по масштабам централизованного теплоснабжения не может сравниться с Россией. Потребление тепловой энергии только в Москве превышает ее суммарное потребление в Нидерландах и Швеции, а потребление тепла в Санкт-Петербурге выше, чем в таких странах — законодателях моды в системах теплоснабжения — как Финляндия или Дания [7]. Большие масштабы и сложность российских современных ТСС определяют важную роль присутствия в них ЦТП, особенно при больших перепадах геодезических отметок.

Безусловно, энергосберегающая ТСС должна работать с применением ИТП. Однако это не значит, что ЦТП должны закрываться. Они выполняют функцию гидравлического стабилизатора и одновременно разделяют систему теплоснабжения на отдельные подсистемы. Из ЦТП в случае применения ИТП исключаются подогреватели ГВС.

При этом за ЦТП также может сохраниться двухтрубная прокладка, но РТС при этом могут работать на пониженных по сравнению с МТС значениях параметров (давлении и температуре теплоносителя). Это позволяет понизить во вторичном контуре потери тепла и теплоносителя вследствие утечек и гарантирует стабильную работу ИТП, исключая их жесткое взаимное влияние по гидравлическому тракту. Широкое внедрение средств автономного регулирования вносит непрерывные возмущения и требует сглаживания резких изменений параметров для МТС.

Возникает также вопрос — насколько велик выигрыш в сокращении расхода энергоресурсов, чтобы затевать коренную и очень дорогостоящую ломку сложившейся системы теплоснабжения. Очевидно, что в каждой конкретной системе теплоснабжения необходимо принимать индивидуальное решение с учетом всех технических и экономических факторов.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Усиление экономических и технологических связей, по мере развития ТСС, сделало чрезвычайно актуальным применение системного подхода к проектированию и управлению их функционированием, поскольку решения, принимаемые по каждому из звеньев в отдельности, не обязательно являются оптимальными для системы в целом. Часто такие решения не удовлетворяют требованиям надежности и управляемости, а иногда просто нереализуемы, особенно в развивающихся системах со сложившейся структурой, где ежегодное увеличение присоединенной нагрузки требует своевременного и обоснованного решения вопросов их реконструкции и расширения.

В настоящее время, учитывая постоянно растущие цены на тепловую энергию, активизируются работы по внедрению средств учета тепла и автономного регулирования его потребления. В свою очередь, обостряется проблема экономической ответственности за сверхнормативные тепловые потери в сетях, которые могут достигать 30 % от отпущенного количества тепла. Выдвигаются более жесткие требования к управлению ТСС, включая и способность оперативно оценивать динамику изменения нагрузок в течение суток, недели, сезонов года, умения рассчитывать и назначать соответствующие режимы работы системы в целом, прогнозировать аварийные ситуации и др. Эти проблемы особенно обостряются в новых экономических отношениях и требуют новых подходов и методов для их решения с максимальным учетом перечисленных факторов.

3. ПРЕДЛАГАЕМАЯ ОБЩАЯ СХЕМА КОЛИЧЕСТВЕННОГО ОБОСНОВАНИЯ УРОВНЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Синтез режимной управляемости состоит в выборе решений по развитию системы, которые обеспечат реализацию наиболее выгодных режимов и облегчат их смену во времени. Создание АСУТП принципиально невозможно без детального предварительного моделирования этого процесса. Поэтому для принятия решений по рациональной автоматизации и оценки их реализуемости предлагается следующая методика.

Этап 1. Имитация работы существующей системы теплоснабжения в течение отопительного периода для оценивания степени управляемости ТСС.

Этап 2. Назначение вариантов повышения управляемости:

- по экспертным оценкам;
- с помощью решения задачи по выбору рациональных мест расстановки промежуточных ступеней регулирования.

Этап 3. Имитационное моделирование работы ТСС:

- по намеченным на этапе 2 вариантам автоматизации;
- с помощью методов оптимального централизованного управления;

Этап 4. Принятие решения по автоматизации. Рассмотрим эти этапы.

3.1. Имитация работы существующей системы теплоснабжения

Данный этап в течение отопительного периода (или любого другого) выполняется с помощью ИВК «АНГАРА-ТС» для расчета теплогидравлических режимов ТСС, разработанного в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН [8—11]. Он позволяет рассчитывать сети произвольной конфигурации (разветвленные, многоконтурные) и структуры (с любым числом и размещением насосных станций, источников, потребителей, регуляторов расхода и давления) с промежуточными ступенями регулирования, с различными схемами присоединения потребителей тепла и разнородными нагрузками (отопление, вентиляция, ГВС). В качестве потребителей выступают ИТП с присоединенными местными системами теплоснабжения или тепловой узел ввода в здание. Расчет производится во времени с учетом остывания по длине, транспортного запаздывания теплоносителя, при различных возмущениях на ИТ, насосных станциях, у потребителей и на участках тепловой сети [12, 13]. Под возмущением понимается изменение любого параметра системы,



переключение в сети (изменение топологии), воздействие автоматики, изменение отбора теплоносителя на ГВС в открытых системах, изменение метеоусловий и др., т. е. в качестве возмущений можно задавать как непредвиденные возмущения, так и сценарий управления.

Упомянутый ИВК снабжен развитым пользовательским интерфейсом, предельно упрощающим процессы занесения и отладки информации, выполнения вычислений и обладает высоким быстродействием, в среднем 20—50 с для многоконтурных сетей, содержащих порядка 25 тыс. ветвей расчетной схемы при расчете на компьютере с процессором Intel i5/3 ГГц, причем время собственно счета составляет 3—5 с; возможностью проведения одно- и многоуровневых расчетов при наличии в ТСС промежуточных узлов управления (ЦТП); возможностью решения задач большой размерности; повышенной надежностью благодаря детальному автоматизированному контролю корректности задания исходных данных и теоретически гарантированной сходимости вычислительного процесса, обеспечивающей получение решения с наперед заданной точностью, которая задается пользователем в диалоговом режиме; возможностью графической визуализации исходной информации и интерпретации результатов расчетов (автоматизированное построение, отображение, спецификация и вывод на печать пьезометрических и температурных графиков); графическим представлением расчетной схемы на фоне городской застройки с возможностью изменения состояний элементов системы; автоматическим определением нарушений в расчетном режиме и их визуализация на схемах; возможностью работы со схемами и данными в компьютерной сети.

Ниже приведена математическая модель ТГР теплоснабжающей системы во времени [12—15].

$$A^{(\tau)} x^{(\tau)} = Q^{(\tau)}, \quad (1)$$

$$\bar{A}^{(\tau)} \bar{P}^{(\tau)} = S^{(\tau)} X^{(\tau)} x^{(\tau)} - H^{(\tau)}, \quad (2)$$

$$\bar{A}_1^{(\tau)} X^{(\tau)} t_1^{(\tau)} + \bar{A}_2^{(\tau)} X^{(\tau)} t_2^{(\tau)} = \theta^{(\tau)}, \quad (3)$$

$$t_1^{(\tau)} = \bar{A}^{(\tau)} T^{(\tau)}, \quad (4)$$

$$t_2^{(\tau)} = F(x^{(\tau)}, t_1^{(\tau)}, t_0^{(\tau)}, \alpha^{(\tau)}), \quad (5)$$

$$\tau^{(v,j)} = \tau_b + R^{(v,j)} \Delta \tau^{(\tau)}, \quad v \in V, j \in J, \tau \in \Omega, \quad (6)$$

$$\Delta \tau_i^{(\tau)} = f(x_i^{(\tau)}) = (l_i \pi d_i^2) / (4 x_i^{(\tau)}), \quad i \in I_1, \quad (7)$$

где $\bar{A}$ и A — матрицы инцидентности узлов и участков: полная и для линейно независимых узлов размерностями $m \times n$ и $(m-1) \times n$ соответственно,

m и n — число узлов и участков расчетной схемы. $\bar{A}_1, \bar{A}_2$ — матрицы ориентации участков размерностью $m \times n$, фиксирующие отдельно начальные и конечные узлы; S, X — диагональные матрицы порядка n , составленные из значений сопротивлений s_i и модулей расходов $|x_i|$ на участках; $\bar{P}$ — полный вектор узловых давлений размерностью m ; x, H — n -мерные векторы расходов и действующих напоров на ветвях; θ, Q — m -мерные векторы узловых расходов тепла и теплоносителя; t_1, t_2 — n -мерные векторы температур в начальных и конечных узлах участков соответственно; T — m -мерный вектор узловых температур для смешанных в узлах потоков; J — множество узлов; I — множество участков схемы $I = I_1 \cup I_2 \cup I_3$; I_1, I_2, I_3 — подмножества участков сети, потребителей, и источников; α, t_0 — n -мерные векторы теплофизических характеристик и температур окружающей среды; c — удельная теплоемкость теплоносителя; Δt — n -мерный вектор разности температур на входе и выходе потребителя или источника тепла; $\Delta \tau$ — n -мерный вектор времени транспорта теплоносителя по участкам; τ — дискретное время наступления события, связанного с достижением температурным фронтом конечного узла участка сети: $\tau \in \Omega, \Omega = \Omega_T \cup \Omega_r, \Omega$ — дискретное множество упорядоченных по времени событий; Ω_T, Ω_r — подмножества времен исполнения возмущений гидравлических и тепловых параметров, причем, $\Omega_T = \Omega_T(\tau_{b,T}, \tau_{b,r})$; $\tau_b, \tau_{b,T}, \tau_{b,r}$ — моменты времени возмущения параметров: любого, теплового и гидравлического; V — подмножество узлов, являющихся источниками возмущения; $R^{(v,j)}$ — $(n_j \times n)$ -матрица всех возможных путей, ведущих по направлению движения теплоносителя из узла v — источника возмущения к узлу j ; n_j — число таких путей; элементы матрицы:

$$r_{kj} = \begin{cases} 0, & \text{если участок } i \text{ не принадлежит } k\text{-му пути,} \\ & \text{ведущему из узла } v \text{ в узел } j; \\ 1, & \text{если участок } i \text{ принадлежит } k\text{-му пути} \\ & \text{из узла } v \text{ в узел } j; \end{cases}$$

$\tau^{(v,j)}$ — вектор промежутков времени, необходимых для прохождения теплоносителем пути от узла v до узла j ; размерность вектора равна числу путей n_j ; F — n -мерная вектор-функция аналитических зависимостей, отражающих изменение температуры теплоносителя на участках.

Функция F теплофизических характеристик участка в уравнении (5) принимает различный вид в зависимости от того, какому элементу ТСС она соответствует: сетевому трубопроводному участку, потребителю или источнику. Так, для i -й ветви трубопроводного участка, $i \in I_1$:

$$t_{2,i} = t_{0,i} + (t_{1,i} - t_{0,i}) \exp\left(-\frac{\pi d_i l_i k_i}{c x_i}\right), \quad (8)$$

где k_i — коэффициент теплопередачи, d_i и l_i — внутренний диаметр и длина участка трубопровода; c — теплоемкость теплоносителя; $t_{0,i}$ — температура окружающей среды.

Для участка-потребителя (ИТП с присоединенными местными системами теплоснабжения) или ЦТП, $i \in I_2$, значение функции F вычисляется с помощью математической модели ТГР тепловых пунктов, которая является составной частью общего комплекса и представляет собой систему из 50-ти уравнений, описывающих процессы потоко-распределения, теплопередачи и теплового баланса в местных системах отопления, ГВС и вентиляции. Модель представлена в работе [14] и в данной статье не приводится в силу ограниченности объема статьи. Расчет ТГР теплового пункта производится с учетом аккумулирующей способности зданий, различных схем присоединения систем отопления и подогревателей ГВС в закрытых системах, калориферов для систем вентиляции (с рециркуляцией и без нее).

Индекс τ означает, что уравнения (1)–(7) справедливы на момент времени τ . Учитывая практическую безынерционность системы по гидравлическому тракту и значительные временные запаздывания по тракту температур, представляется правомерным применение квазидинамического подхода для решения рассматриваемой задачи.

Сделаем необходимые пояснения к модели (1)–(7):

— учитывая, что для решения практических задач нет необходимости рассматривать температурное поле по длине участков и достаточно знания температур по узлам сети, время τ в данной модели связано с топологией, и поэтому $\Delta\tau$ дискретизируется не на равные промежутки, а на время транспорта теплоносителя до узла сети;

— зависимость от времени означает, что все величины могут быть в любой момент изменены (возмущены) по закону, заданному исследователем; сказанное относится в полной мере и к изменению структуры матрицы $A^{(\tau)}$. Следовательно, можно моделировать все типы возмущающих воздействий, в том числе и переключения в сети (изменение топологии).

Сложность ТСС и протекающих в них процессов, иерархия структуры построения, а также различные принципы регулирования отпуска нагрузки в сетях разного уровня обуславливают целесообразность применения для моделирования ТГР систем теплоснабжения развиваемого в ИСЭМ СО РАН подхода — многоуровневого моделирования [8–10, 12], которое базируется на методах эквивалентирования и декомпозиции как расчетных схем, так и задач.

Технология многоуровневого моделирования ТСС, применяемая для решения данной задачи, обеспечивает возможности:

- уменьшения размерности расчетных задач;
- обобщимости результатов расчетов;
- согласования результатов решения задач, требующих разной степени подробности моделей;
- преодоления разобщенности информационных и математических моделей при решении задач управления ТСС на разных ведомственных, территориальных, организационных и временных уровнях;
- потенциальной применимости технологий параллельных вычислений, что, в свою очередь, позволяет выполнять расчеты ТСС большой размерности за меньшее время.

Различные приемы упрощения и понижения размерности расчетных схем достаточно часто применяются при моделировании ТСС. Большая часть публикаций на эту тему имеет абстрактный теоретический характер в отрыве от конкретных объектов приложения [16, 17]. Другая часть работ посвящена конкретным задачам, где способы упрощения рассматриваются попутно и ориентированы на специальные свойства: систем [18, 19]; задач проектирования и реконструкции [18, 19, 21], оперативного управления [19]; привлекаемых моделей (стационарных [18, 19, 21, 22], динамических [20, 23–25] и др.). Автору неизвестны работы, специально посвященные многоуровневому моделированию ТСС как комплексному подходу для анализа и управления режимами.

В связи с достаточной сложностью моделирования теплогидравлических режимов ТСС введем упрощающие предположения:

- сопротивления участков сети считаются не зависящими от температуры теплоносителя, что позволяет пользоваться моделями с сосредоточенными параметрами и рассчитывать гидравлический режим независимо от теплового;
- скоротечность гидравлических процессов порождает безынерционность реакции сети на гидравлические воздействия, что позволяет гидравлические режимы рассчитывать без временной составляющей;
- тепловые пункты (и обслуживаемые ими здания — потребители), представляющие собой сис-



темы с происходящими внутри них сложными гидравлическими и тепловыми процессами, в общей математической модели будем представлять участками с эквивалентными характеристиками (сопротивлениями, разностью температур на входе и выходе и временем транспорта теплоносителя через тепловой пункт или потребителя). Значения характеристик вычисляются с помощью математической модели ТГР теплового пункта [14].

Принятые допущения позволяют рассчитывать гидравлический режим независимо от теплового и применить декомпозицию ТСС на тепловые сети и тепловые пункты (или потребителей в случае ИТП). Таким образом, задача моделирования ТГР с промежуточными узлами управления сводится к расчету ТГР тепловой сети, которая, в свою очередь, состоит из двух подзадач — теплового и гидравлического расчета; расчета ТГР теплового пункта (ЦТП или ИТП с присоединенным зданием) и последующей их увязки.

Отсюда с очевидностью вытекает квазидинамический способ решения задачи (1)—(7) — задачи теплогидравлического расчета.

1. Рассчитывается в качестве исходного гидравлический режим (потокораспределение) (1), (2) и соответствующее ему стационарное температурное поле (3)—(5), которое будет оставаться таковым до момента возмущения τ_b .

2. В момент воздействия τ_b в зависимости от типа возмущения (тепловое или гидравлическое) производятся два вида операций:

а) если воздействие тепловое (изменение температуры на ИТ или ЦТП), то вычисляется по формуле (7) вектор $\Delta\tau$, соответствующий режиму п. 1; строятся матрицы $R^{(v,j)}$ и определяется по выражению (6) вектор промежутков времени $\tau^{(v,j)}$, необходимых для прохождения теплоносителем пути от узла v до узла j ; формируется ранжированная в порядке возрастания по времени последовательность исполнения событий по достижению температурным фронтом конечных узлов участков; затем последовательно для моментов времени из выражения (6) выполняются операции теплового расчета (3)—(5), которые продолжаются до тех пор, пока процесс не установится или пока не наступит новое возмущение;

б) если возмущение гидравлическое (изменение действующих напоров, расходов в узлах, топологии сети и пр.), то рассчитывается гидравлический режим, соответствующий этим изменениям по уравнениям (1) и (2); по формуле (7) для данного режима вычисляется новый вектор времен транспорта теплоносителя по участкам $\Delta\tau$ и далее выполняются действия, описанные в п. а).

В системе теплоснабжения теплогидравлические режимы регулируются с помощью регуляторов

расхода, давления и температуры, изменением напоров насосов, температуры или (и) расхода теплоносителя на выходе из ИТ или промежуточной ступени регулирования. При этом независимыми параметрами (управляющими) будут расходы и температуры теплоносителя на выходе из источников тепла и промежуточной ступени регулирования, напоры насосов на источниках, подкачивающих и перекачивающих подстанциях, уставки регуляторов. Давления, температуры и расходы теплоносителя в остальных узлах системы являются зависимыми параметрами.

Центральное регулирование отпуска тепла от ИТ может осуществляться тремя способами: качественное (изменением температур при постоянном расходе теплоносителя), количественное (изменением расходов при постоянной температуре теплоносителя) и комбинированное (изменением температур и расходов теплоносителя). Как правило, существующие системы работают по качественному графику. Внедрение средств автономного регулирования позволяет перейти к количественному и комбинированному регулированию.

При имитации работы системы по графику центрального качественного регулирования в неавтоматизированных системах нужно задать в качестве исходных данных сценарий произведенного за рассматриваемый период регулирования: изменение во времени температуры теплоносителя на выходе ИТ (при наличии нескольких ИТ для каждого из них). Информация о моментах регулирования и значениях температур берется из журналов диспетчеров, которые ведутся на предприятиях тепловых сетей (либо на ИТ). Кроме температур, в них фиксируются давления на насосных станциях и ИТ в течение всего отопительного сезона. Для систем с промежуточными ступенями регулирования необходимо задать моменты исполнения возмущений, места их приложения и новые значения параметров. При выполнении расчетов на предстоящий период сценарий задаются по температурному графику [26].

При количественном регулировании задается сценарий изменения расходов на выходах ИТ, ЦТП и (или) ИТП с указанием времени их исполнения. При комбинированном регулировании в сценарий возмущения включаются изменения температур и расходов.

В принципе, таким образом можно смоделировать любые виды регулирования, управления или внешнего возмущения, а именно:

— изменение отбора теплоносителя ГВС по часам суток в открытых системах;

— изменение гидравлического сопротивления на любом из участков сети или на некоторой их совокупности (при закрытии-открытии регулирующей арматуры);

— изменение уставок регуляторов (значение параметра, который должен поддерживать регулятор);

— переключения в сети, т. е. изменение топологии — исключение или добавление одного или нескольких участков в любой момент времени (послеаварийные режимы);

— изменение напоров насосных станций;

— воздействия автоматики;

— изменение метеоусловий и др.

После формирования сценария возмущений выполняется динамический теплогидравлический расчет с помощью ИВК «АНГАРА-ТС», т. е. осуществляется ретроспективный анализ работы системы за истекший период. Результаты расчета позволяют получить интегрированные за период времени показатели:

— по количеству недополученной потребителями теплоты;

— по избыточному количеству теплоты, отпущенной потребителям;

— по суммарным (сверхнормативным) потерям тепла в сети.

Было бы неправильно для оценки обеспеченности потребителей пользоваться средней за расчетный период обеспеченной нагрузкой. Она может оказаться близкой к требуемой, в то время как в отдельные моменты времени потребитель недополучал требуемое количество тепла, а в другие был «перетоплен». Поэтому будем пользоваться показателями степени обеспеченности в каждый момент времени с последующим вычислением интегральных показателей.

Качество теплоснабжения отдельного i -го потребителя можно оценить по степени отклонения количества полученной им теплоты θ_i от требуемого значения θ_i^* [27–29]. Степень обеспеченности i -го потребителя в момент времени τ можно выразить характеристикой:

$$\Omega_i^d(\tau) = (\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau))\vartheta, \quad i \in I_2, \quad (9)$$

где ϑ — весовой коэффициент; $\vartheta = 1$, если $(\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau)) > 0$, т. е. потребитель ощущает дефицит теплоты; $\vartheta = 0$, если $(\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau)) \leq 0$, т. е. потребитель обеспечен тепловой энергией в нужном количестве или находится в состоянии «перетопа».

Суммарный дефицит тепла i -го потребителя за расчетный период T при k -м сценарии регулирования можно определить соотношением

$$\Psi_i^{d(k)} = \int_0^T \Omega_i^{d(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_2. \quad (10)$$

Суммарный дефицит тепла для всех потребителей при k -м сценарии регулирования

$$D^{(k)} = \sum_{i \in I_2} \Psi_i^{d(k)}. \quad (11)$$

Средний дефицит за расчетный период T при k -м сценарии

$$\Psi_{i_{cp}}^{d(k)} = \frac{1}{T} \int_0^T \Omega_i^{d(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_2. \quad (12)$$

Повторив расчеты N раз для различных сценариев внешних возмущений при заданных правилах управления, можно вычислить среднеожидаемый дефицит i -го потребителя:

$$M[\Psi_{i_{cp}}^d] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Psi_{i_{cp}}^{d(k)}, \quad i \in I_2. \quad (13)$$

Дисперсия:

$$\sigma_i^2 \approx \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left[\left(\Psi_{i_{cp}}^{d(k)} - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Psi_{i_{cp}}^{d(k)} \right) \right)^2 \right], \quad i \in I_2. \quad (14)$$

Аналогично формулам (9)–(14) вычисляются интегрированные за расчетный период времени показатели избыточного количества тепловой энергии, отпущенной потребителям.

Избыточное количество тепла, отпущенного i -му потребителю в момент времени τ :

$$\Omega_i^n(\tau) = (\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau))\vartheta, \quad i \in I_2, \quad (15)$$

где $\vartheta = 1$, если $(\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau)) < 0$, т. е. потребитель «перетоплен», $\vartheta = 0$, если $(\theta_i^*(\tau) - \theta_i(\tau)) \geq 0$, т. е. потребитель обеспечен требуемым количеством теплоты или ощущает дефицит.

Суммарное избыточное количество теплоты, отпущенное i -му потребителю за расчетный период T при k -м сценарии регулирования:

$$\Psi_i^{n(k)} = \int_0^T \Omega_i^{n(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_2. \quad (16)$$

Суммарное избыточное количество теплоты для всех потребителей при k -м сценарии регулирования:

$$\Pi^{(k)} = \sum_{i \in I_2} \Psi_i^{n(k)}. \quad (17)$$



Средний избыток тепла за расчетный период T при k -м сценарии:

$$\Psi_{i_{cp}}^{n(k)} = \frac{1}{T} \int_0^T \Omega_i^{n(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_2. \quad (18)$$

Средний ожидаемый избыток тепла i -го потребителя:

$$M[\Psi_{i_{cp}}^n] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \Psi_{i_{cp}}^{n(k)}, \quad i \in I_2. \quad (19)$$

Дисперсия:

$$\sigma_i^2 \approx \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left[\left(\Psi_{i_{cp}}^{n(k)} \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(\Psi_{i_{cp}}^{n(k)} \right) \right) \right]^2, \quad i \in I_2. \quad (20)$$

Обозначив θ_i^H — нормативные потери тепла на участке, а θ_i^Φ — потери, полученные расчетным путем (причем в расчете учитывается способ прокладки, состояние и тип изоляции, в том числе и влажность), получим значения превышения потерь тепла на участках теплосети над нормативными:

$$\Omega_i^{\text{пот}}(\tau) = (\theta_i^\Phi(\tau) - \theta_i^H(\tau))\vartheta, \quad i \in I_1, \quad (21)$$

где $\vartheta = 1$, если $\theta_i^\Phi(\tau) - \theta_i^H(\tau) > 0$, т. е. состояние изоляции не обеспечивает нормативные потери, $\vartheta = 0$, если $\theta_i^\Phi(\tau) - \theta_i^H(\tau) \leq 0$, т. е. потери в сети не превышают нормативные.

Суммарное превышение потерь тепла над нормативными на i -м участке за расчетный период T при k -м сценарии регулирования:

$$\Psi_i^{\text{пот}(k)} = \int_0^T \Omega_i^{\text{пот}(k)}(\tau) d\tau, \quad i \in I_1. \quad (22)$$

Суммарное превышение потерь для всех участков сети при k -м сценарии:

$$L^{(k)} = \sum_1^n \Psi_i^{\text{пот}(k)}, \quad i \in I_1. \quad (23)$$

Отметим, что при вычислениях по формулам (21)–(23) попутно можно определить наиболее неблагоприятные участки, которые нужно в первую очередь перекладывать, что имеет большое значение на практике при ограниченных финансовых средствах.

3.2. Синтез режимной управляемости сети теплоснабжения

После проведения имитационных расчетов работы системы за истекший период и получения значений показателей (9)–(20) можно перейти к решению вопроса размещения дополнительных узлов регулирования. Нормальный режим функционирования систем теплоснабжения определяется как расчетный режим функционирования при нормальных условиях, когда обеспечиваются значения заданных параметров режима работы в установленных пределах. Система управляема, если она способна реализовать все расчетные режимы. Синтез режимной управляемости состоит в выборе решений по развитию системы, которые обеспечат реализацию наиболее выгодных режимов и облегчат их смену во времени.

Варианты повышения степени управляемости исследуемой ТСС (расстановка КРП, ЦТП и ИТП с соответствующим набором регулирующих органов) можно назначить как по экспертным оценкам специалистов, хорошо знающих систему и имеющих большой опыт эксплуатации, так и с помощью решения задачи расстановки промежуточных ступеней регулирования, которую можно решить, применяя изложенный далее подход.

Сначала выполняется анализ существующего состояния ТСС и режимов при сложившихся условиях эксплуатации. Выявляются «узкие места», нарушения режима и количественно оценивается имеющийся уровень снабжения потребителей. Для этого выполняются расчеты по воспроизведению теплогидравлических режимов ТСС при существующей схеме их эксплуатации и параметрах на ИТ и ЦТП, которые поддерживались в прошедшем отопительном и летнем периодах.

При проектировании новых и реконструкции действующих ТСС, а также при разработке эксплуатационных режимов рассматриваются все основные гидравлические режимы. В том числе [30]: расчетный — по расчетным расходам сетевой воды в отопительный период; летний — при максимальной нагрузке ГВС в неотапливаемый период; статический — при отсутствии циркуляции теплоносителя в тепловой сети; некоторые наиболее вероятные аварийные режимы. Для открытых ТСС: зимний — при максимальном отборе воды на ГВС из обратного трубопровода; переходный (осеннее-весенний) — при максимальном отборе воды на ГВС из подающего трубопровода.

Для оценки управляемости в любом из перечисленных режимов необходимо задать сценарий регулирования в рассматриваемом периоде и рассчитать ТГР по модели (1)–(8). Для анализа дефицитных режимов в условиях ограничения мощности ИТ или ограничения сетевой воды на ЦТП (вследствие аварийной ситуации) и послеаварий-

ных режимов, сопровождающихся целенаправленными переключениями переключателей в сети (изменение топологии), расчеты необходимо производить на период ремонтно-восстановительных работ при новой конфигурации сети. При этом система должна обеспечивать резервную норму подачи тепловой энергии потребителям в соответствии со справочно-нормативными документами [30, 31]:

$$\varphi \theta^p \leq \theta \leq \theta^p,$$

где θ^p и θ — количество теплоты, отпущенное на абонентский ввод потребителя в расчетном и текущем режимах; φ — допустимое снижение подачи теплоты потребителю в аварийном или дефицитном режиме. Для потребителей первой категории $\varphi = 1$.

Вычислив значения дефицитов и «перетоков» для всех потребителей системы по уравнениям (9)–(20) параллельно с расчетами по модели (1)–(8), проранжируем потребителей в рамках каждой распределительной сети по признаку их обеспеченности требуемым количеством тепла за расчетный период.

Далее будем работать с каждой распределительной сетью отдельно. Все узлы разветвления схемы сети можно рассматривать как обобщенные потребители, предшествующие по потоку определенным группам реальных потребителей. Учитывая свойство иерархической подчиненности потребителей в указанном смысле, можно наметить места установки дополнительных узлов регулирования (КРП, ЦТП) для минимизации дефицита («перетопа») у реальных потребителей нижележащих уровней. Алгоритм состоит в построении путей от потребителей в направлении, обратном течению теплоносителя, полученного из расчета потоко-распределения (см. рисунок).

Значения дефицита и «перетопа» потребителя присваивается подводящему участку. В узле связи участков, принадлежащих путям от различных потребителей (назовем его узел z), делается проверка обеспеченности теплом для всех ответвлений и суммирование дефицитов (и «перетоков» раздельно) $D_{z\ \Sigma}^{(k)}$ ($\Pi_{z\ \Sigma}^{(k)}$), вычисленных по уравнениям (10), (12), (16), (18).

Затем вычисляется средний суммарный дефицит (и «перетоп») всех потребителей, связанных с данным узлом z за расчетный период:

$$D_{z\ \text{ср}}^{(k)} = \frac{1}{T} D_{z\ \Sigma}^{(k)}, \quad \Pi_{z\ \text{ср}}^{(k)} = \frac{1}{T} \Pi_{z\ \Sigma}^{(k)}.$$

Для узлов, соединяющих несколько неблагополучных ответвлений (три и более) вычисляется требуемая тепловая нагрузка в узле. Установка ЦТП намечается, если $D_{z\ \text{ср}}^{(k)}$ составляет более 10 %

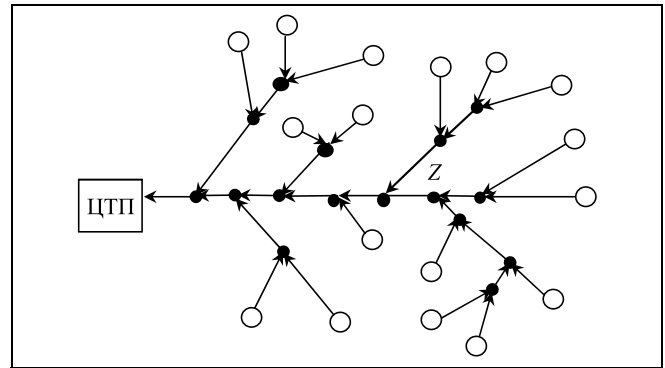


Схема алгоритма расстановки промежуточных ступеней управления

от требуемой нагрузки, и эта нагрузка лежит в пределах от 2 до 10 МВт, что составляет оптимальную нагрузку ЦТП.

Если в РТС имеются только единицы неблагополучных потребителей, а основная масса получает требуемое тепло, то рациональнее установить ИТП и осуществлять местное регулирование.

Таким образом, намечается несколько различных вариантов автоматизации, которые следует проверить на обеспечение режимной управляемости и сравнить по затратам и окупаемости.

3.3. Имитация работы сети теплоснабжения

После расстановки промежуточных ступеней регулирования осуществляется имитация работы ТСС по намеченным в п. 3.2 вариантам автоматизации. Для имитации многоступенчатого регулирования ТСС была разработана избыточная схема обобщенного теплового пункта, в которой заложены различные схемы присоединения теплотехнического оборудования, а также обозначены места установки регулирующей арматуры. Универсальная математическая модель теплогидравлических режимов тепловых пунктов, разработанная в ИСЭМ СО РАН [14], позволяет моделировать работу как ЦТП, так и ИТП. В данной статье модель не приводится в силу ограниченности объема статьи. В случае ЦТП под тепловым пунктом понимается узел регулирования и присоединенные к нему трубопроводы РТС до вводов в здания (для учета тепловых потерь в разводящих сетях). В случае ИТП — узел регулирования с присоединенными местными системами отопления, вентиляции и ГВС. В зависимости от назначения теплового пункта (ЦТП или ИТП) в нем может присутствовать тот или иной набор теплотехнического оборудования и регулирующих органов.

Имитация работы ТСС при многоступенчатом регулировании проводится аналогично описанному выше принципу с применением многоуров-



невого моделирования [32, 33]. Сравнение намеченных вариантов автоматизации по показателям (18)–(20) позволит выбрать наиболее рациональный вариант автоматизации тепловых сетей. Можно дополнить выбор вариантов сравнением по затратам на автоматизацию и срокам окупаемости. Выбор рациональной схемы автоматизации должен дополняться разработкой методов оптимального централизованного управления, что служит предметом отдельного рассмотрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение надежности, экономичности и качества работы современных сетей теплоснабжения требуют комплекса мероприятий, связанных как с внедрением технических средств измерения, регулирования и учета отпуска и потребления тепловой энергии, так и с разработкой методов и математических моделей для анализа и повышения режимной управляемости.

Анализ режимной управляемости требует привлечения математических моделей, позволяющих имитировать работу сетей теплоснабжения во времени в соответствии с заданным сценарием возмущающих и управляющих воздействий. Предложенная математическая модель для расчета теплогидравлических режимов во времени основана на многоуровневом подходе, позволяющем имитировать режимы крупных сетей с промежуточными ступенями управления, проводить расчеты сетей большой размерности за меньшее время.

Для количественной оценки режимной управляемости предложены интегральные за расчетный период показатели обеспеченности потребителей тепловой энергией, основанные на разработанной в ИСЭМ СО РАН динамической модели для расчета теплогидравлических режимов сетей теплоснабжения.

Разработанные интегральные показатели степени обеспеченности потребителей, позволяют принять решение о размещении дополнительных узлов управления для повышения режимной управляемости. Разработана общая схема количественного обоснования уровня автоматизации сетей теплоснабжения и алгоритм определения мест дополнительных узлов регулирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Громов Н.К. Городские теплофикационные системы. — М.: Энергия, 1974. — 253 с.
2. Чистович С.А., Аверьянов В.К., Темпель Ю.Я., Быков С.И. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления. — Л.: Стройиздат, 1987. — 248 с.
3. Чистович С.А., Громов Н.К. Принципы рационального построения тепловых сетей и управления режимами их работы. — Киев, 1982.
4. Давыдов А.Н. Экономическая эффективность ликвидации ЦТП // Новости теплоснабжения. — 2004. — № 12.
5. Дубсон М.И. Методы и способы контроля за техническим состоянием и эксплуатацией тепловых сетей и эффективной работой ИТП на опыте предприятия «Ригас Силтумс» // Новости теплоснабжения. — 2008. — № 4.
6. Ливчак В.И. Установка ИТП в зданиях вместо замены изношенного оборудования в ЦТП и перекадки сетей горячего водоснабжения // Энергосбережение. — 2008. — № 1. — С. 36–40.
7. Башмаков И.А. Повышение энергоэффективности в системах теплоснабжения. Часть 1. Проблемы российских систем теплоснабжения // Энергосбережение. — 2010. — № 2. — С. 46–51.
8. Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И., Алексеев А.В. Опыт разработки и применения информационно-вычислительных комплексов для расчета и организации режимов работы крупных систем теплоснабжения // Тр. междунар. науч. конф. «Энергетика и рыночная экономика», Улан-Батор, 2005. — С. 323–329.
9. Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Шалагинова З.И., Алексеев А.В. Принципы реализации и направления развития ПВК для расчета режимов теплоснабжающих систем / Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании // Тр. X Байкальской Всерос. конф., Иркутск, ИСЭМ СО РАН, 2005. — Часть II. — С. 285–294.
10. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Разработка методики многоуровневого наладочного теплогидравлического расчета систем теплоснабжения и ее реализация в составе ИВК «АНГАРА-ТС» / Математическое моделирование трубопроводных систем энергетики: Математические модели и методы анализа и оптимального синтеза развивающихся трубопроводных и гидравлических систем». — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2010. — С. 300–314.
11. Токарев В.В., Шалагинова З.И. Опыт применения информационно-вычислительного комплекса «АНГАРА-ТС» для организации режимов и разработки наладочных мероприятий теплоснабжающих систем крупных городов // Вестник ИРГТУ. — 2011. — № 12 (59). — Раздел «Энергетика». — С. 240–248.
12. Шалагинова З.И. Методы теплогидравлического анализа режимов крупных теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. — 2009. — № 12. — С. 44–49.
13. Алексеев А.В., Гребнева О.А., Новицкий Н.Н. и др. Математические модели и методы для оценки и реализации потенциала энергосбережения при управлении режимами теплоснабжающих систем / Исследования и разработки Сибирского отделения Российской академии наук в области энергоэффективных технологий. — Новосибирск: Научно-исследовательский институт молекулярной биологии и биофизики, 2009. — С. 38–49.
14. Шалагинова З.И. Математическая модель для расчета теплогидравлических режимов тепловых пунктов теплоснабжающих систем // Теплоэнергетика. — 2016. — № 3. — С. 69–80.
15. Шалагинова З.И. Разработка и применение методов расчета теплогидравлических режимов в системах теплоснабжения с многоступенчатым регулированием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Иркутск: Сиб. энергетический ин-т, 1995. — 24 с.
16. Sakalkar V., Hajel P. Multilevel decomposition based nondeterministic design optimization for structural systems // Advances in Engineering Software. — 2011. — Vol. 42, iss. 1–2. — P. 1–11. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2010.10.002>.
17. Lu J., Han J., Hu Y., Zhang G. Multilevel decision-making: A survey // Information Sciences. — 2016. — Vol. 346. — P. 463–487. — DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2016.01.084>.

18. Lazzaretto A., Toffolo A., Morandin M., von Spakovsky M.R. Criteria for the decomposition of energy systems in local/global optimizations // *Energy*. — 2010. — Vol. 35, iss. 2. — P. 1157–1163. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.009>.
19. Nardo A.D., Cavallo A., Natale M.D., et al. Dynamic Control of Water Distribution System Based on Network Partitioning // *Procedia Engineering*. — 2016. — Vol. 154. — P. 1275–1282. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.460>.
20. Schweiger G., Larsson P.-O., Magnusson F., et al. District heating and cooling systems — Framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization // *Energy*. — 2017. — Vol. 137. — P. 566–578. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.115>.
21. Vesterlund M., Dahl J. A method for the simulation and optimization of district heating systems with meshed networks // *Energy Conversion and Management*. — 2015. — Vol. 89. — P. 555–567. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.002>.
22. Guelpa E., Toro C., Sciacovelli A., et al. Optimal operation of large district heating networks through fast fluid-dynamic simulation // *Energy*. — 2016. — Vol. 102. — P. 586–595. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.058>.
23. Vesterlund M., Toffolo A., Dahl J. Optimization of multi-source complex district heating network, a case study // *Energy*. — 2017. — Vol. 126. — P. 53–63. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.018>.
24. Guelpa E., Sciacovelli A., Verda V. Thermo-fluid dynamic model of large district heating networks for the analysis of primary energy savings // *Energy*. — 2017. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.177>.
25. Gilani B.S., Bachmann M., Kriegl M. Evaluation of the temperature regimes of multi-level thermal networks in urban areas through exergy analysis // *Energy Procedia*. — Sept. 2017. — Vol. 122. — P. 385–390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.424>.
26. Шалагинова З.И. Задачи и методы расчета температурных графиков отпуска тепла на основе теплогидравлического моделирования систем теплоснабжения // *Теплоэнергетика*. — 2004. — № 7. — С. 41–49.
27. Шалагинова З.И. Проблемы обеспечения режимной управляемости современных теплоснабжающих систем и возможные подходы к их решению // *Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. — Надежность систем энергетики: экономические и информационные аспекты*. — СПб., 1997. — Вып. 49. — С. 504–512.
28. Шалагинова З.И. Методы анализа режимной управляемости и их применение для оценки качества функционирования теплоснабжающих систем // *Теплоэнергетика*. — 2012. — № 5. — С. 63.
29. Новицкий Н.Н., Сухарев М.Г., Тевяшев А.Д. и др. Трубопроводные системы энергетики: Методические и прикладные проблемы математического моделирования. — Новосибирск, 2015. — 476 с.
30. СП 124.13330.2012. Свод правил. Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003 / утв. Приказом Минрегиона РФ от 30.06.2012, № 280.
31. СП 60.13330.2012. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование». Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.
32. Новицкий Н.Н., Шалагинова З.И., Токарев В.В., Гребнева О.А. Технология разработки эксплуатационных режимов крупных систем теплоснабжения на базе методов многоуровневого теплогидравлического моделирования // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. — 2018. — № 1. — С. 12–24.
33. Шалагинова З.И., Новицкий Н.Н., Токарев В.В., Гребнева О.А. Многоуровневое моделирование теплогидравлических режимов больших систем теплоснабжения // *Сб. статей всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление»*, 1–3 сентября 2015 г., Иркутск, Россия. — Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. — С. 389–398.

Статья представлена к публикации членом редколлегии И.Б. Ядыкиным.

Шалагинова Зоя Ивановна — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, shalaginova@isem.irk.ru.

Новая книга

Волковицкий А.К., Каршаков Е.В., Павлов Б.В. Магнитоградиентные измерительные системы и комплексы: моногр. в 2 т. — Т. 1: Принципы измерений и структура магнитоградиентных комплексов. — 149 с. — Т. 2: Обработка информации и применение магнитоградиентных комплексов. — 134 с. — М.: ИПУ РАН, 2018.

Представлены направления исследований в двух аспектах — инженерном и информационном. В первом томе рассмотрены основные принципы магнитоградиентных измерений и особенности их технической реализации. Рассмотрены основные варианты структуры магнитоградиентных измерительных систем. Дан анализ технических характеристик и особенностей магниточувствительных датчиков и возможностей их применения в составе измерительных систем. Приведена обобщенная модель процесса измерений параметров магнитоградиентного поля. Второй том посвящен аспектам вычислительной обработки данных при магнитоградиентных измерениях. Особое внимание уделено алгоритмам калибровки измерительных систем и комплексов, установленных на подвижных носителях. Рассмотрены основные принципы и алгоритмы решения задачи магнитоградиентного обнаружения. Приведены примеры применения магнитоградиентных комплексов.

Для широкого круга специалистов в области измерений магнитного поля, разработчиков технических средств, алгоритмов и программ вычислительной обработки измерений, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПЛАНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ

Ю.М. Цодиков

Сформулирована задача оптимального планирования производства нефтеперерабатывающего завода в виде, предусматривающем ее решение методом последовательного линейного программирования. Рассмотрены факторы, влияющие на сходимость данного метода при решении нелинейных задач большой размерности. Приведен пример нелинейной модели. Исследовано влияние точности решения и даны рекомендации по улучшению его сходимости для сложных моделей.

Ключевые слова: оптимальное планирование, последовательное линейное программирование, нелинейное программирование, многопериодное планирование.

ВВЕДЕНИЕ

Модели оптимального планирования и управления нефтеперерабатывающим заводом (НПЗ) носят динамический характер. Динамика в задачах планирования НПЗ связана с учетом внешних для предприятия и внутренних факторов: макроэкономическими условиями, рынком сбыта продукции, поставками сырья, выполнением программ реконструкции, ремонтами оборудования, условиями транспортировки продукции, запасами продуктов, возможностями оборудования, качеством сырья, климатическими условиями, экологическими нормами и другими условиями работы завода. Все эти факторы изменяются во времени и существенно влияют на результаты моделирования. Модели оптимального планирования часто рассматривают как многопериодные, в которых для каждого периода можно учитывать любые перечисленные факторы. Такой подход универсален для построения модели завода, численного решения, интерпретации и анализа результатов. Он применяется также для моделирования предприятий нефтехимической промышленности и других производств.

Многопериодные модели оптимального планирования для НПЗ рассматривались в ряде работ

[1–5]. Для решения рассматриваемых задач был предложен метод последовательного линейного программирования (ПЛП) [6, 7]. Примеры применения метода ПЛП для оптимизации нелинейных моделей НПЗ описаны также в работах [2–4]. В этих публикациях предполагается, что нелинейные функции в модели оптимизации достаточно гладкие и не имеют разрывов. Метод ПЛП в разных вариантах применяется в системах оптимизации планов НПЗ и нефтяных компаний [8, 9]. В настоящей работе рассматриваются различные факторы, влияющие на эффективность метода ПЛП для решения задач большой размерности, так как условия сходимости и эффективности метода недостаточно изучены.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА МНОГОПЕРИОДНОЙ МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТЫ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ЗАВОДА

Модели оптимального планирования работы НПЗ являются нелинейными моделями большой размерности. Модель завода включает в себя подмодели всех технологических процессов завода и учитывает качество сырья, данные технологичес-

кой схемы, требования к качеству товарных продуктов, цены на сырье, продукты, энергоносители и вспомогательные материалы.

Модель оптимального планирования НПЗ формулируется как модель многопериодной оптимизации на p периодов:

$$F = \sum_{t=1}^p \sum_{j=1}^n c_j^t x_{jr}^t, \quad F \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ijr}^t x_{jr}^t = b_i^t, \quad t = 1, \dots, p, \quad i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

$$x_{jr}^t \geq 0,$$

$$\underline{d}_j \leq \sum_{t=1}^p x_{jr}^t \leq \bar{d}_j, \quad j \in J^0, \quad (3)$$

$$y_{wr}^{t+1} = y_{wr}^t + \sum_{j \in J_w^+} x_{jr}^t - \sum_{j \in J_w^-} x_{jr}^t, \quad 0 \leq y_{wr}^t \leq S_w, \quad (4)$$

$$t = 1, \dots, p, \quad w = 1, \dots, W,$$

$$a_{ijr}^t = f_{ij}(q_{ijr-1}^t), \quad (5)$$

$$q_{ijr-1}^t = \varphi_{ij}(x_{1r-1}^t, x_{2r-1}^t, \dots, x_{nr-1}^t). \quad (6)$$

Здесь F — прибыль; x_{jr}^t — переменные задачи: материальные потоки сырья различных установок, продуктов или энергоносителей в период t ; y_{wr}^t — запасы продуктов к концу периода t ; r — шаг вычислительного процесса (рекурсии), состоящий в решении задачи (1)–(4); a_{ijr}^t — элементы матрицы $A^r\{a_{ijr}^t\}$; c_j^t — цены, b_i^t , $\underline{d}_j$, $\bar{d}_j$ — параметры ограничений; S_w — объем резервуара для продукта (максимальный запас) в единицах массы в любом периоде; J_w^+ — множество потоков, пополняющих запас; J_w^- — множество потоков, расходующих запас; J^0 — множество общих ограничений на весь горизонт планирования T . Длительность τ_t периодов может быть различной, весь горизонт планирования фиксирован $T = \sum_{t=1}^p \tau_t$. Часть элементов

матрицы a_{ijr}^t постоянные, а другие определены соотношениями (5), (6). Задача линейного программирования (ЛП) (1)–(4) может быть как многопериодной, так и однопериодной ($p = 1$).

Задача ЛП (1)–(4) решается при заданных начальных значениях величин q_{ij0}^t и элементов мат-

рицы. После решения задачи ЛП (1)–(4) те коэффициенты матрицы a_{ijr}^t , которые определены зависимостями (5), (6), пересчитываются на каждом шаге r вычислительного процесса.

Величины q_{ijr-1}^t по физическому смыслу это, как правило, показатели качества сырья и продуктов установок или показатели качества компонентов смесей, которые определяются на шаге $r - 1$ в зависимости от переменных x_{jr-1}^t ; $f_{ij}(q_{ijr-1}^t)$ — заданные нелинейные или линейные зависимости; $\varphi_{ij}(x_{1r-1}^t, x_{2r-1}^t, \dots, x_{nr-1}^t)$ — заданные нелинейные функции, определяющие расчет соответствующих показателей качества нефтепродуктов. При первом, $r = 1$, решении задачи (1)–(4) начальные значения показателей q_{ij0}^t заданы.

Задача (1)–(6) — нелинейная со значительным числом переменных, которые входят в нелинейные зависимости. Ограничения (2) становятся нелинейными при подстановке в них зависимостей (5). Форма записи задачи (1)–(6) предполагает решение методом последовательного моделирования и оптимизации, который рассматривается как вариант ПЛП [3]. В результате моделирования зависимостей (5), (6) определяются параметры линеаризованной модели (1)–(4), а затем решается задача ЛП (1)–(4). После получения решения задачи ЛП проверяется погрешность моделирования путем сравнения значений параметров: q_{ijr-1}^t и q_{ijr}^t , а также элементов матрицы a_{ijr}^t , которые пересчитываются. Этот процесс рекурсивно повторяется до получения заданной погрешности моделирования и линеаризации:

$$|q_{ijr}^t - q_{ijr-1}^t| \leq \varepsilon_k. \quad (7)$$

Величины q_{ijr}^t имеют разную физическую природу и разную погрешность определения ε_k для каждого показателя качества k . В решаемых задачах разных погрешностей было более 20. Список основных показателей качества, участвующих в расчетах, и структура соотношений (5), (6) приведены далее. Для каждой модели задаются допустимые погрешности ε_k величин q_{ijr}^t и a_{ijr}^t .

Постановка нелинейной задачи в форме (1)–(7) отличается от обычной формулировки ПЛП [6] более детальным определением процесса линеаризации. Задача ПЛП была сформулирована в работе [6] как задача планирования на один период, эта формулировка приведена также в работе [2], но тогда не было данных об эффективности этого метода для решения нелинейных задач большой раз-



мерности. Основная особенность формулировки задачи (1)—(7) состоит в том, что для показателей q_{ijr}^t можно задать технически обоснованные требования к погрешности расчета ε_k .

В системе моделирования нефтепереработки и нефтехимии RPMS [9] реализован вариант задачи (1)—(7), в котором структура матрицы A^r одинакова для каждого периода, а ограничения (2) от периода к периоду отличаются значениями коэффициентов b_i^t и элементов матрицы, которые определяются соотношениями (5), (6) в процессе рекурсий. Такая неизменность структуры матрицы для разных периодов создает некоторые сложности для формулировки таких задач планирования, когда в периодах возможно изменение направления потоков в схеме завода, например, при ремонтах или реконструкции установок. В другой системе моделирования нефтепереработки и нефтехимии PIMS, разработанной позднее, определение структуры матрицы для периодов аналогично.

2. СТРУКТУРА НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ (5), (6)

Модель НПЗ состоит из подмоделей установок и смесей нефтепродуктов. Для подмодели установки показатели качества продукта q_{ijr-1}^t могут быть постоянными или определяться в зависимости от качества сырья и режима работы установки по соотношениям (5), (6). Соотношения (5), (6) могут включать в себя технологические зависимости: свойства смеси от количества и качества компонентов, выход продукта установки от качества сырья, качество продукта установки от качества сырья, качество продукта установки от нагрузки установки и др. В модель завода могут быть включены любые показатели качества нефтепродуктов. Как минимум, в модель НПЗ включают такие показатели качества для разных продуктов переработки нефти: относительную плотность при 20 °С, содержание серы, фракционный состав; показатели для бензиновых фракций (упругость паров, содержание ароматики, октановое число); для дизельных фракций (цетановое число, вязкость, температуру вспышки, температуру застывания), для авиакеросина (температуру вспышки, температуру кристаллизации). Все перечисленные показатели качества продуктов установок могут определяться по соотношениям (5), (6). (Далее в § 3 (см табл. 2) приведены показатели качества, которые обычно учитываются, и технологически обоснованные значения погрешности расчета.)

Рассмотрим простой пример соотношений (5), (6) для расчета относительной плотности d_{pr} основного продукта установки, когда плотность про-

дукта зависит от плотности сырья d_{row} этой установки. Сырье установки является смесью двух потоков x_1 и x_2 , которые поступают с других установок и имеют плотности d_1 и d_2 .

Соотношение (6) для плотности сырья установки представляет собой нелинейную функцию:

$$d_{row} = (x_1 + x_2)/(x_1/d_1 + x_2/d_2). \quad (8)$$

Соотношение (5) для плотности продукта установки имеет вид:

$$d_{pr} = \alpha_1 + \alpha_2 d_{row}, \quad (9)$$

где коэффициенты α_1 и α_2 определены на основе статистических или проектных данных о работе установки. Плотность продукта d_{pr} входит как коэффициент в различные ограничения (2), например, когда этот продукт поступает на смешение товарных нефтепродуктов. В свою очередь, потоки x_1 и x_2 получают на других установках, и их плотность может определяться аналогично по сырью. Таким образом, по технологической цепочке установок определяются свойства продуктов в процессе рекурсий. Другие показатели качества продуктов также определяются аналогично соотношениями (5), (6), но соответствующие зависимости могут быть более сложными, чем приведенные выше для расчета плотности. В результате значительное число элементов a_{ijr}^t матрицы A^r , определяемых соотношением (5), пересчитывается в процессе рекурсий.

Технологическая цепочка состоит, как минимум, из 2—3-х установок. Нелинейные зависимости (5), (6) могут быть связаны для нескольких установок. Например, для цепочки из трех установок только для расчета плотности в модель будут входить три соотношения (8), (9). Число таких нелинейных зависимостей определяет общую сложность модели.

Для подмодели смешения нелинейные зависимости (5), (6) возникают в том случае, когда компонент смеси товарного продукта образуется в результате объединения нескольких потоков. Например, в ограничение для плотности смеси товарного продукта в этом случае будет входить элемент a_{ijr}^t матрицы A^r , равный плотности компонента, которая определяется нелинейной функцией (8). Другие показатели качества определяются по более сложным зависимостям, например, вязкость смеси рассчитывается по индексам, которые являются нелинейными функциями от вязкости компонентов смеси. В модель НПЗ входит значительное число таких нелинейных зависимостей, определяемых промежуточными смешениями [2].

3. ОСОБЕННОСТИ СХОДИМОСТИ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

С учетом структуры нелинейных зависимостей (5), (6) рассмотрим факторы, влияющие на эффективность метода ПЛП для задач большой размерности: сложность задачи, требования к точности выполнения нелинейных зависимостей (5), (6), возможность задать близкие к оптимальным начальные значения показателей q_{ij0}^t , вид нелинейных функций (5), (6) и метод решения задачи ЛП. Под эффективностью метода ПЛП здесь понимается точность при ограниченном числе рекурсий.

Сложность задачи зависит от размерности и структурной сложности, т. е. от того, сколько подмоделей установок включено в общую модель завода, а также, сколько потоков сырья, продуктов и энергоносителей связывают подмодели. В модели завода может быть несколько тысяч элементов матрицы A^{tr} , которые пересчитываются на основе нелинейных зависимостей (5), (6).

При анализе причин нарушения условия сходимости (7) часто выявляются незначительные потоки, по которым условия (7) нарушаются. Например, для смеси при небольшом ее количестве состав смеси оказывается нестабильным, т. е. может существенно изменяться при расчете следующей рекурсии, причем значение целевой функции при расчете следующей рекурсии не изменяется. В процессе исследования сходимости для таких потоков исключалась проверка условия (7), что значительно улучшало сходимость. При этом погрешность расчета качества для данной смеси может увеличиться. В производственных условиях НПЗ этот способ улучшения сходимости модели не всегда применим, так как у специалистов нет времени для такого исследования при частой корректировке модели.

Требования к погрешности ε_k для показателей q_{ijr}^t , определяемых зависимостями (6), существенно ниже, чем к погрешности решения ε_{LP} задачи ЛП (1)–(4). Обычно $\varepsilon_{LP} = 10^{-7}$, допустимая погрешность расчета плотности 0,001, а допустимая погрешность расчета других показателей больше. Учет технически обоснованных требований к точности наряду с другими факторами позволяет объяснить высокую эффективность метода ПЛП. Пусть $\varepsilon_{\min}$ — минимальное значение ε_k . Если условие $\varepsilon_{LP} \ll \varepsilon_{\min}$ не выполняется, то метод ПЛП практически не работает. Это проверено экспериментально на разных моделях НПЗ. Такая проверка выполнялась для исследования возможностей метода ПЛП. Таким образом, требование $\varepsilon_{LP} \ll \varepsilon_{\min}$

является условием эффективности метода ПЛП для задач большой размерности, которое определено экспериментально. Для задач небольшой размерности это условие может не выполняться.

Технически обоснованное требование к погрешности ε_k расчета показателя качества нефтепродукта должно быть согласовано с погрешностью метода его измерения, а также с погрешностью метода расчета при смешении. Различия в значениях ε_k для разных показателей качества нефтепродуктов очень существенны (см. далее в § 4 табл. 2), значения ε_k в которой служат хорошим примером согласования погрешности ε_k с погрешностью измерения при разработке модели НПЗ. Если заданное требование по погрешности ε_k не обеспечивает сходимости, то допустимую погрешность ε_k приходится увеличивать. При этом нужно убедиться в корректности нелинейных зависимостей (5), (6) и достоверности начальных значений q_{ij0}^t . Например, проверить достоверность для рассматриваемой установки зависимостей (5), (6) по данным производственного учета и лабораторным исследованиям.

Начальные значения показателей q_{ij0}^t , определяемые по текущим лабораторным исследованиям при работе установок завода в нормальных режимах, могут быть достаточно близки к оптимальным. Поэтому задание реальных начальных значений показателей q_{ij0}^t важно для получения решения. При расчете нескольких вариантов выбор начальных значений q_{ij0}^t для текущего расчета из предыдущего решения, как правило, существенно сокращает число рекурсий.

Предполагается, что нелинейные функции (5), (6) $\varphi_{ij}(x_{1r-1}^t, x_{2r-1}^t, \dots, x_{nr-1}^t)$ и $f_{ij}(q_{ijr-1}^t)$ непрерывные, т. е. не имеют разрывов. Это условие для нелинейной задачи оптимизации во всех публикациях, посвященных методу ПЛП, рассматривалось как условие возможности применения данного метода [2, 6, 7].

Оптимальное решение задачи ЛП (1)–(4) может быть получено симплекс-методом или методом барьерных функций [10]. Решение задачи ЛП методом барьерных функций дает решение в точке x^* при включении в барьерные функции условий $x_{jr}^t \geq 0$ для всех переменных. В этом случае, если оптимальное решение задачи ЛП достигается в области Q значений переменных, то точка x^* удалена от всех границ области Q . Решение задачи ЛП (1)–(4) симплекс-методом может дать решение в любой вершине области оптимальных значений переменных. Можно предположить, что сходимость



метода ПЛП для задач большой размерности будет лучше, если решение для любой задачи ЛП достигается в точке, удаленной от границ области Q . Для проверки этого предположения была решена серия из 10 задач ПЛП двумя методами [11]. В среднем число рекурсий незначительно сократилось при решении методом барьерных функций по сравнению с симплекс-методом.

4. ПРИМЕРЫ МОДЕЛЕЙ ЗАВОДОВ

Рассмотрим примеры моделей НПЗ в виде (1)–(6). Модели разрабатывались с помощью системы RPMS [8]. Эта система автоматизирует построение общей модели завода на основе подмоделей отдельных процессов, проверяет данные, обращается к пакету программ оптимизации XPRESS и после решения формирует отчеты о результатах расчета. Система применяется для текущего планирования работы НПЗ, нефтяных компаний и для планирования реконструкции заводов. Задача ЛП (1)–(4) решается с помощью пакета программ XPRESS. В программе XPRESS задача ЛП большой размерности решается методом барьерных функций (Primal-dual barrier algorithm). Если этим методом не удастся получить решение с требуемой точностью, то тогда найденное решение может быть стартовой точкой для решения симплекс-методом.

В табл. 1 приведены основные характеристики моделей двух НПЗ. Модель НПЗ 1 разработана для НПЗ с глубокой переработкой нефти, который получает два вида нефтяного сырья (нефть и газовый конденсат) и производит товарные нефтепродукты, соответствующие Евро-5, и нефтехимические продукты. Модель НПЗ 1 включает в себя подмодели установок, смешения нефтепродуктов и объектов общезаводского хозяйства. Некоторые установки моделируются по блокам, если это необходимо. Далее кратко описаны в основном принципы и особенности моделирования, а не технологическая схема.

Табл. 1 характеризует сложность оптимизационной модели завода. В таблице приведены число подмоделей установок и смесей, из которых формируется модель НПЗ и размерность задачи ЛП для одного периода. В число установок включены объекты общезаводского хозяйства и блоки некоторых установок. Нелинейные зависимости модели связаны в основном с влиянием качества сырья установок, в том числе нефти на выход и качество продуктов, а также со смесями, для которых рассчитываются показатели качества на основе качества компонентов. Примерно 10 % ненулевых элементов матрицы A^T определяются зависимостями (5), (6). В строке «Число потоков...» указаны пото-

ки с разными свойствами, а общее число потоков примерно соответствует числу переменных модели.

Список показателей качества нефтепродуктов, которые рассчитываются в модели, и погрешности ε_k , при которых останавливаются рекурсии, приведены в табл. 2. Значения показателей качества нефтепродуктов для планирования переработки нефти описаны в работах [2, 12].

Таблица 1

Основные характеристики моделей

Характеристика	НПЗ 1	НПЗ 2
Число переменных задачи ЛП	2843	4915
" ограничений задачи ЛП	4323	3370
" ненулевых элементов матрицы	26 273	27 818
" периодов планирования	1	3
" установок	149	61
" смесей (с расчетом показателей качества)	94	64
Число потоков продуктов и сырья установок	526	272

Таблица 2

Показатель качества нефтепродуктов

k	Показатель	Погрешность ε_k	
		абсолютная	относительная, %
1	Плотность, т/м ³	0,001	—
2	Содержание серы, % масс.	0,01	—
3	Октановое число, моторн.	0,1	—
4	Октановое число, исслед.	0,1	—
5	Давление паров, мм. рт. ст.	2	—
6	Содержание ароматики, %	1	—
7	Содержание олефинов, %	1	—
8	Содержание бензола, %	0,1	—
9	Выкипание при 70 °С, %	0,5	—
10	Выкипание при 100 °С, %	0,5	—
11	Выкипание при 150 °С, %	0,5	—
12	Выкипание при 180 °С, %	0,5	—
13	N + 2A сырья риформинга, %	2	—
14	Содержание парафинов, %	2	—
15	Индекс температуры застывания	—	5
16	Индекс температуры вспышки	—	5
17	Индекс вязкости (при 80 °С)	—	5
18	Цетановое число	1	—
19	Дизельный индекс	1	—
20	Фракционный состав (50 %), °С	2	—
21	Фракционный состав (90 %), °С	2	—
22	Фракционный состав (96 %), °С	2	—
23	Индекс вязкости (при 20 °С)	—	5
24	Выкипание при 280 °С, %	2	—
25	Выкипание при 360 °С, %	2	—

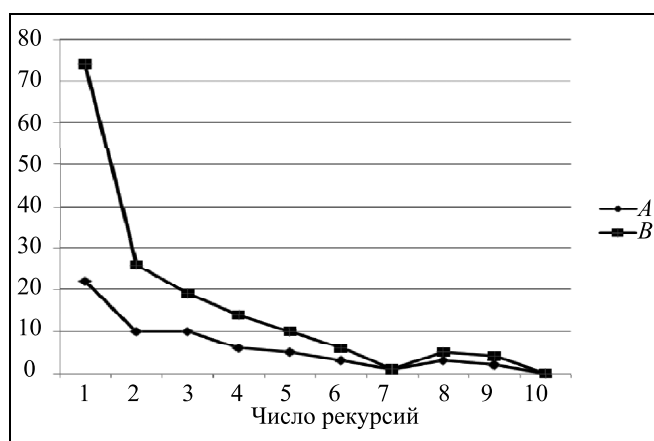


График сходимости: *A* — показатели качества, для которых нарушается сходимость; *B* — общее число нарушений условия сходимости

Определение технически обоснованного требования к погрешности расчета ε_k показателя качества нефтепродукта рассмотрим на примере октанового числа бензина. Для октанового числа в таблице принято ε_k равное 0,1 пункта при условии, что точность измерения октанового числа в лаборатории 0,1 и для смеси точность расчета по линеаризованной модели 0,2 пункта.

При задании погрешности ε_k нужно учитывать, что расчет некоторых показателей свойств нефтепродуктов взаимосвязан, поэтому и погрешности расчета таких показателей взаимосвязаны. Так, например, плотность нефтепродукта входит в формулы расчета объема и, следовательно, в расчеты других свойств смеси, определяемых по объемной концентрации. Поэтому для обеспечения достоверности точность расчета плотности должна быть выше точности расчета других показателей. Другой пример зависимости показателей связан с выбором режима работы установки. Выбор режима установки в процессе оптимизации зависит от качества сырья и нагрузки, а выбранный режим влияет на выход продуктов и различные показатели качества продуктов. Например, содержание серы в бензине каткрекинга влияет на режим его гидроочистки, а выбранный режим влияет не только на содержание серы, но и на октановое число бензина после гидроочистки.

Расчет показателей, приведенных в табл. 2, задается для разных потоков: сырья установок, продуктов установок, товарных продуктов и промежуточных смесей. Превышение заданной погрешности приводит к повторению рекурсии. Задается максимальное число рекурсий, после которого процесс останавливается. В этом случае требуемая точность расчета некоторых показателей не достигну-

та, т. е. погрешность расчета по этим показателям превышает допустимую, условие сходимости рекурсий не выполнено. Решение получено, но необходимо дополнительный анализ задачи. Таким образом, сложность задачи и точность ее решения взаимосвязаны.

Для модели НПЗ 1 ход решения показан на рисунке, решение сходится за 10 рекурсий.

На графике *A* показано число разных показателей качества, для которых условие сходимости (7) нарушалось; на графике *B* показано общее число нарушений условия сходимости (7) на каждом шаге рекурсии. Графики на рисунке наглядно демонстрируют процесс сходимости. В данном расчете из общего списка 25-ти показателей (см. табл. 2) условие сходимости нарушалось для 22 показателей, т. е. почти все показатели качества продуктов изменялись в процессе решения.

В модели осуществляется контроль исходных данных и решения путем сравнения по массе количества сырья и всех продуктов, включая потери. Для этого все подмодели технологических установок имеют баланс по массе сырья и продуктов. При таком контроле необходимо вычисление плотности продуктов, в том числе небольших по количеству, которые могут существенно изменяться в процессе рекурсий по количеству и составу. Поэтому для этих потоков целесообразно исключить проверку выполнения условия (7) по плотности и всем показателям качества для улучшения сходимости, так как расчет качества таких потоков нужен только для информации.

На модели НПЗ 2 проверялось изменение сходимости при изменении значения $\varepsilon_{\min}$ от 0,001 до 0,00001 и соответствующего изменения значений всех ε_k . Для применения модели НПЗ достаточная точность расчетов будет при значении $\varepsilon_{\min} = 0,001$. Эксперимент с меньшими значениями $\varepsilon_{\min}$ выполнялся для исследования потенциальных возможностей метода ПЛП для задач большой размерности. В результате было установлено, что при значении $\varepsilon_{\min}$ не более 0,00001 устойчиво получить решение задачи методом ПЛП невозможно. Это проверялось и на других моделях аналогичной сложности. Для задач такой размерности должно выполняться условие $\varepsilon_{LP} \ll \varepsilon_{\min}$.

Для корректности сравнения разных расчетов в примерах предусмотрено выполнение двух условий, улучшающих сходимость. Для продуктов, которые производятся в небольших количествах, и по которым нет ограничений на показатели качества, исключена проверка условия сходимости. Потоки, которые используются только в особых случаях (при ремонте установок, при пуске, в непредвиденных ситуациях), исключаются.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе приведенных примеров и опыта разработки моделей разных заводов рассмотрены основные факторы, влияющие на эффективность применения метода последовательного линейного программирования для решения задач большой размерности. Приведенные данные объясняют причины эффективности метода в случае сложных моделей. Данные о сходимости метода последовательного линейного программирования при решении задач планирования большой размерности показывают, что возможно успешное применение этого метода для аналогичных нелинейных задач оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coxhead R.E. Integrated Planning and Scheduling Systems for the Refining Industry. In Optimization in industry. Mathematical Programming and Modeling Techniques in Practice / Eds. T.A. Ciriani, R.C.J. Leachman — N.-Y.: Wiley&Sons, 1994. — P. 185—199.
2. Дудников Е.Е., Цодиков Ю.М. Типовые задачи оперативного управления непрерывным производством. — М.: Энергия, 1979. — 272 с.
3. Цодиков Ю.М., Хохлов А.С. Нелинейные модели оптимального планирования работы нефтеперерабатывающего завода // Тр. VII Московской междунар. конф. по исследованию операций (ORM2013) / ВЦ РАН. — М., 2013. — Т. 2. — С. 54—56.
4. Цодиков Ю.М. Оптимальное календарное планирование для непрерывного производства с ограничением на структуру графика // Автоматика и телемеханика. — 2008. — № 1. — С. 171—179.
5. Шишорин Ю.Р., Цодиков Ю.М., Мостовой Н.В. и др. Комплексный подход компании Honeywell к разработке долгосрочных программ развития перерабатывающих предприятий вертикально-интегрированных компаний // Автоматизация в промышленности. — 2015. — № 4. — С. 53—60.
6. Griffith R.E., Steward R.A. A nonlinear programming technique for the optimization continuous processing systems // Management Science. — 1961. — Vol. 7, N 4. — P. 379—392.
7. Zang J., Kim N., Lasdon L. An improved successive linear programming algorithm // Management Science. — 1985. — Vol. 31, N 10. — P. 1312—1331.
8. Соркин Л.Р. Современные технологии управления в нефтегазовом комплексе. — М.: МФТИ, 2003. — 104 с.
9. Refinery and Petrochemical Modeling System (RPMS). — URL: <https://www.honeywellprocess.com/en-US/explore/products/advanced-applications/software-production-management/Pages/rpms.aspx> (дата обращения: 17.09.2017).
10. Gondzio J. Interior point method 25 years later // European Journal of Operational Research. — 2012. — Vol. 218. — P. 583—601.
11. Цодиков Ю.М., Макаров Д.В. Особенности сходимости метода последовательного линейного программирования для задач оптимального планирования // Тр. VIII Московской междунар. конф. по исследованию операций (ORM2016) / МАКС Пресс. — М., 2016. — Т. 2. — С. 54—56.
12. Мановян А.К. Технология первичной переработки нефти и природного газа. — М.: Химия, 2001. — 567 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Г. Лебедевым.

Цодиков Юлий Моисеевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, tsodikov_y@mail.ru.

Систематизирующие обзоры, опубликованные в журнале «Проблемы управления» в 2017—2019 гг.

- ✓ Гусев В.Б. Модели автономного управления в развивающихся системах. — 2018. — № 6. — С. 2—17.
- ✓ Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В. Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 1. Традиционные подходы к проблеме. — 2018. — № 6. — С. 18—23.
- ✓ Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов при посадке на взлетно-посадочную полосу. Ч. 1. Статическая задача формирования оптимальной очереди воздушных судов на прилет. — 2018. — № 4. — С. 2—13.
- ✓ Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 2. Методы приближенного решения. — 2018. — № 5. — С. 2—13.
- ✓ Митришкин Ю.В., Коренев П.С., Прохоров А.А. и др. Управление плазмой в токамаках. Ч. 1. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Токамаки. Компоненты систем управления. — 2018. — № 1. — С. 2—20.
- ✓ Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Павлова Е.А. и др. Управление плазмой в токамаках. Ч. 2. Системы магнитного управления плазмой. — 2018. — № 2. — С. 2—30.
- ✓ Шведов А.С. Аппроксимация функций с помощью нейронных сетей и нечетких систем. — 2018. — № 1. — С. 21—29.
- ✓ Шведов А.С. Нечеткое математическое программирование: краткий обзор. — 2017. — № 3. — С. 2—10.
- ✓ Логинов М.П. Дорожные карты: понятие, сущность, классификация. — 2017. — № 5. — С. 2—17.

МНОГОКОНТУРНОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ ПРИ РЕШЕНИИ ТРАЕКТОРНЫХ ЗАДАЧ¹

В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев

Рассмотрены алгоритмы параметрической адаптации с эталонными моделями, обеспечивающие астатизм и оценивание возмущений. Предложена структура системы управления, позволяющая синтезировать многосвязные регуляторы, обеспечивающие движение вдоль заданных траекторий объекта, описываемого кинематикой и динамикой механических систем в трехмерном пространстве. С помощью метода функций Ляпунова доказана асимптотическая устойчивость замкнутой адаптивной системы с контуром обеспечения астатизма. Проведен анализ ошибок оценивания возмущений асимптотическим наблюдателем. Показана ограниченность ошибки оценивания и приведены соотношения для настройки параметров наблюдателя. Приведены результаты численных исследований.

Ключевые слова: адаптивное управление, эталонная модель, траекторное управление, астатизм, асимптотический наблюдатель, многоконтурная адаптация, параметрическая адаптация.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее часто системы адаптивного управления подвижными объектами строятся на основе методов беспойсковой адаптации [1, 2]. При этом применяются алгоритмы оценивания и идентификации [3, 4] или самонастройка с эталонной моделью [5–8]. Каждый из методов адаптации обладает известными преимуществами и недостатками [1, 2, 8, 9]. Совмещение преимуществ или устранение недостатков тех или иных методов адаптивного управления возможно благодаря применению комбинированных систем [10, 11].

В настоящей работе предлагаются алгоритмы комбинированной системы управления подвижным объектом, строящейся на основе адаптивных систем с эталонной моделью [5–7]. Такие системы позволяют управлять нелинейными нестационарными объектами [12, 13], учитывать ограничения

на фазовые переменные и управляющие воздействия [14, 15], адаптироваться к структурной неопределенности [16, 17], а также применять алгоритмы оценивания неизмеряемых переменных или возмущений [17].

В работах [18–20] предложена комбинированная система управления, включающая в себя эталонную модель, контур обеспечения астатизма [21], контур параметрической адаптации и робастный алгоритм оценки возмущений. Рассмотрена также задача позиционирования подвижного объекта, описываемого уравнениями движения твердого тела. В настоящей статье рассматривается задача построения комбинированной системы управления при движении объекта вдоль заданной траектории с требуемой скоростью. Траекторные задачи управления [22] отличаются повышенной сложностью и актуальны в современной робототехнике, требующей реализации высокоточного движения в средах с препятствиями. Кроме того, в этой работе представлен сравнительный анализ точности замкнутой системы при различных сочетаниях контуров управления.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-08-00013.



1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическая модель подвижного объекта представлена в виде [18–20]:

$$\dot{y} = R(y)x, \quad (1)$$

$$\dot{x} = M^{-1}(F_u + F_d(y, x, t)), \quad (2)$$

где y — измеряемый вектор линейных и угловых координат в неподвижной системе координат размерностью 6×1 ; x — измеряемый вектор линейных и угловых скоростей в связанной системе координат размерностью 6×1 ; $R(y)$ — матрица кинематики размерностью 6×6 , зависящая от углов Эйлера [23, с. 15–17]; F_u — вектор управляющих сил и моментов размерностью 6×1 ; $F_d(y, x, t)$ — вектор прочих сил и моментов размерностью 6×1 ; M — матрица инерционных параметров размерностью 6×6 .

Относительно модели (1), (2) делаются следующие предположения:

— элементы матрицы инерционных параметров M — постоянные величины на интервалах:

$$M(i, j) \in [M_{ij}^{\min}, M_{ij}^{\max}],$$

где $M_{ij}^{\min}$, $M_{ij}^{\max}$, $i, j = \overline{1, 6}$ — постоянные величины;

— вектор $F_u = F_u(u, k_\delta)$ является функцией вектора управляющих воздействий u и вектора интервальных параметров $k_\delta^i \in [k_{\delta\min}^i, k_{\delta\max}^i]$, где $k_{\delta\min}^i$, $k_{\delta\max}^i$ — постоянные параметры; вектор u имеет размерность m ;

— вектор сил и моментов $F_d(y, x, t)$ неопределенный и представляется в виде:

$$F_d(y, x, t) = F_{d1}(y, x) + F_{d2}(t),$$

$$\|F_{d1}(y, x)\| \leq A_{Fy}\|y\| + A_{Fx}\|x\|,$$

$$|F_{d2}^i(t)| \leq F_{d2}^{i0}, \quad |\dot{F}_{d2}^i(t)| \leq \dot{F}_{d2}^{i0}, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (3)$$

где A_{Fx} , A_{Fy} , F_{d2}^{i0} , $\dot{F}_{d2}^{i0}$ — постоянные величины; $\|\cdot\|$ — операция вычисления нормы; $|\cdot|$ — операция вычисления модуля.

Траекторная и скоростная ошибки задаются в виде [18–20]:

$$\psi_{tr} = A_1 Y y + A_2 y + A_3, \quad (4)$$

$$\psi_{ck} = A_4 x + A_5, \quad (5)$$

где A_1 , A_2 — постоянные матрицы размерностью $\mu \times 6$, A_4 — постоянная матрица размерностью $\nu \times 6$, A_3 — вектор задающих воздействий размерностью

$\mu \times 1$, A_5 — вектор задающих воздействий размерностью $\nu \times 1$.

Размерность вектора ψ_{tr} равна μ , а размерность вектора ψ_{ck} равна ν . Матрица Y — диагональная $Y = \text{diag}(y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 y_6)$.

Формирование траекторной ошибки в виде выражения (4) позволяет сформировать требования к желаемой траектории движения в пространстве внешних координат в виде прямых или кривых второго порядка. Задание скоростной ошибки в форме (5) позволяет сформировать постоянные требования к скоростям движения объекта.

Ставится задача: найти вектор управляющих воздействий в виде функции $F_u(x, y)$ переменных состояния объекта (1), (2), обеспечивающий асимптотическую устойчивость ошибок (4), (5) относительно нулевого состояния.

2. СИНТЕЗ ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛИ

Процедура синтеза комбинированной адаптивной системы управления состоит из этапов синтеза эталонной модели, синтеза основного контура с обеспечением астатизма и параметрической адаптацией и синтеза наблюдателя аддитивных возмущений. В данном параграфе рассматривается этап синтеза эталонной модели, которая состоит из совокупности номинальной модели и номинального управления. Такая эталонная модель позволяет учесть особенности объекта управления, например, ограничения на углы тангажа и крена, связанные с условиями управляемости. Иными словами, наличие эталонной модели в виде совокупности «номинальная модель + номинальное управление» позволяет настроить эту эталонную модель таким образом, чтобы она не генерировала нереализуемых движений.

Рассмотрим номинальную модель подвижного объекта

$$\dot{y}_m = R(y_m)x_m, \quad (6)$$

$$\dot{x}_m = M_m^{-1}(F_{um} + F_{dm}), \quad (7)$$

где y_m — вектор координат номинальной модели; x_m — вектор скоростей номинальной модели; $R(y_m)$ — матрица кинематики номинальной модели; F_{um} — вектор управляющих сил и моментов номинальной модели; F_{dm} — вектор прочих сил и моментов, приложенных к номинальной модели; M_m — матрица инерционных параметров номинальной модели. Все векторы и матрицы в уравнениях (6), (7) имеют те же размерности, что и соответствующие векторы и матрицы в модели (1), (2).

Матрица $R(y_m)$ имеет ту же структуру, что и матрица $R(y)$.

В отличие от модели объекта (1), (2) номинальная модель известна, т. е.:

— элементы матрицы M_m — постоянные известные параметры;

— вектор $F_{um} = F_{um}(u_m, k_{\delta m})$ является функцией вектора управляющих воздействий u и вектора постоянных известных параметров $k_{\delta m}$;

— вектор прочих сил и моментов $F_{dm}(y_m, x_m, t)$ известен.

Векторы ошибок номинальной модели (6), (7) подвижного объекта сформируем, в соответствии с выражениями (4), (5), в виде

$$\psi_{trm} = A_1 Y_m y_m + A_2 y_m + A_3, \quad (8)$$

$$\psi_{ckm} = A_4 x_m + A_5, \quad (9)$$

$$Y_m = \text{diag}([y_{1m} \ y_{2m} \ y_{3m} \ y_{4m} \ y_{5m} \ y_{6m}]).$$

Потребуем, чтобы векторы (8), (9) удовлетворяли уравнениям вида

$$\ddot{\psi}_{trm} + T_2 \dot{\psi}_{trm} + T_1 \psi_{trm} = 0, \quad (10)$$

$$\ddot{\psi}_{ckm} + T_3 \psi_{ckm} = 0, \quad (11)$$

где T_1 , T_2 и T_3 — диагональные положительно определенные постоянные матрицы.

Вычислив первую и вторую производные по времени от векторов ψ_{trm} (8) и ψ_{ckm} (9) в силу уравнений (6), (7) и подставив их в формулы (10), (11), получим

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} (2A_1 Y_m + A_2)R(y_m) \\ A_4 \end{bmatrix} \dot{x}_m = \\ & = - \begin{bmatrix} (2A_1 \dot{Y}_m R(y_m)x_m + (2A_1 Y_m + A_2)\dot{R}(y_m)x_m + \\ + T_2 \dot{\psi}_{trm} + T_1 \psi_{trm} \\ T_3 \psi_{ckm} \end{bmatrix}, \quad (12) \end{aligned}$$

где $\dot{R}(y_m)$ — производная матрицы $R(y_m)$, вычисляемая в соответствии с работой [16, с. 538],

$$\dot{\psi}_{trm} = (2A_1 \dot{Y}_m + A_2)\dot{y}_m = (2A_1 \dot{Y}_m + A_2)R(y_m)x_m,$$

$$\ddot{\psi}_{trm} = 2A_1 \dot{Y}_m R(y_m)x_m + (2A_1 \dot{Y}_m + A_2)\dot{R}(y_m)x_m + (2A_1 \dot{Y}_m + A_2)R(y_m)\dot{x}_m,$$

$$\dot{Y}_m = \text{diag}([\dot{y}_{1m} \ \dot{y}_{2m} \ \dot{y}_{3m} \ \dot{y}_{4m} \ \dot{y}_{5m} \ \dot{y}_{6m}]).$$

Для нахождения управления представим вектор управляющих сил и моментов в виде

$$F_{um} = K_{\delta m} u_m, \quad (13)$$

где $K_{\delta m}$ — матрица размерности $6 \times (\mu + \nu)$.

Выражение (13) — это линейное преобразование главного вектора управляющих сил и моментов F_{um} к силам и моментам u_m , создаваемым исполнительными механизмами. Далее вектор u_m пересчитывается в углы поворотов и тяги двигателей в соответствии с процедурой, представленной в работах [19, 24]. В статье [19] такой подход успешно применен в системе управления автономного необитаемого подводного аппарата, а в статье [24] — в системе управления роботизированной воздухоплавательной платформы. Также примем число каналов управления $m = \mu + \nu$. Случай $m \neq \mu + \nu$ рассмотрен в работе [24].

Из выражения (12), с учетом выражений (7) и (13), находим

$$\begin{aligned} u_m = & - \left(\begin{bmatrix} (2A_1 Y_m + A_2)R(y_m) \\ A_4 \end{bmatrix} M_m^{-1} K_{\delta m} \right)^{-1} \times \\ & \times \left(\begin{bmatrix} (2A_1 Y_m + A_2)R(y_m) \\ A_4 \end{bmatrix} M_m^{-1} F_{dm} + \right. \\ & \left. + \begin{bmatrix} (2A_1 \dot{Y}_m R(y_m)x_m + (2A_1 Y_m + A_2)\dot{R}(y_m)x_m + \\ + T_2 \dot{\psi}_{trm} + T_1 \psi_{trm} \\ T_3 \psi_{ckm} \end{bmatrix} \right). \quad (14) \end{aligned}$$

Уравнения (6)—(9), (13), (14) представляют собой эталонную модель подвижного объекта. Проведем анализ устойчивости, введя квадратичную функцию

$$\begin{aligned} V_1 = & \frac{1}{2} \psi_{ckm}^T \psi_{ckm} + \psi_{trm}^T T_1 \psi_{trm} + \frac{1}{2} \dot{\psi}_{trm}^T \dot{\psi}_{trm} + \\ & + \frac{1}{2} (\dot{\psi}_{trm} + T_2 \psi_{trm})^T (\dot{\psi}_{trm} + T_2 \psi_{trm}). \quad (15) \end{aligned}$$

Производная по времени от выражения (15), вычисленная в силу уравнений замкнутой системы,

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & -\psi_{ckm}^T T_3 \psi_{ckm} + 2\psi_{trm}^T T_1 \dot{\psi}_{trm} + \\ & + \dot{\psi}_{trm}^T (-T_1 \psi_{trm} - T_2 \dot{\psi}_{trm}) + (\dot{\psi}_{trm} + T_2 \psi_{trm})^T \times \\ & \times (-T_1 \psi_{trm} - T_2 \dot{\psi}_{trm} + T_2 \dot{\psi}_{trm}) = -\psi_{ckm}^T T_3 \psi_{ckm} - \\ & - \psi_{trm}^T T_1 T_2 \psi_{trm} - \dot{\psi}_{trm}^T T_2 \dot{\psi}_{trm}. \quad (16) \end{aligned}$$

Синтез управления номинальной моделью (6), (7) позволяет корректно сформировать матрицы T_1 и T_2 уравнений (10), (11), а также оценить разницу между номинальной моделью и подвижным объектом, основываясь на разнице между номинальным



управлением (14) и реальными значениями сил и моментов, подаваемых на подвижный объект.

Далее описанная процедура синтеза управления номинальным объектом будет применена с некоторыми изменениями, для нахождения управления реальным подвижным объектом (1), (2).

3. АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ АСТАТИЗМА

Ошибки системы управления заданы в виде (4), (5). Для повышения точности следящей системы вводятся цепочки интеграторов

$$\begin{aligned}\dot{z}_1 &= z_2, \dot{z}_2 = z_3, \dots, \dot{z}_{n_{tr}} = \psi_{tr} - \psi_{trm} = \\ &= A_1 Y y + A_2 y - A_1 Y_m y_m - A_2 y_m,\end{aligned}\quad (17)$$

$$\begin{aligned}\dot{\chi}_1 &= \chi_2, \dot{\chi}_2 = \chi_3, \dots, \dot{\chi}_{n_{ck}} = \psi_{ck} - \psi_{ckm} = \\ &= A_4 x - A_4 x_m,\end{aligned}\quad (18)$$

где n_{tr} — число интеграторов, обеспечивающих астатизм порядка $n_{tr} - 1$ по траекторной ошибке; n_{ck} — число интеграторов, обеспечивающих астатизм порядка $n_{ck} - 1$ по скоростной ошибке; $z_j, j = \overline{1, n_{tr}}, \chi_k, k = \overline{1, n_{ck}}$ — дополнительные переменные.

Тогда траекторная и скоростная ошибки подвижного объекта задаются в виде

$$\begin{aligned}e_{tr} &= A_1 Y y + A_2 y - A_1 Y_m y_m - A_2 y_m + \\ &+ B_1 z_1 + \dots + B_{n_{tr}-1} z_{n_{tr}},\end{aligned}\quad (19)$$

$$e_{ck} = A_4 x - A_4 x_m + C_1 \chi_1 + \dots + C_{n_{ck}-1} \chi_{n_{ck}}, \quad (20)$$

где $B_j, C_k, j = \overline{1, n_{tr}}, k = \overline{1, n_{ck}}$ — матрицы коэффициентов регулятора.

Потребуем, чтобы траекторная и скоростная ошибки удовлетворяли уравнениям

$$\ddot{e}_{tr} + T_2 \dot{e}_{tr} + T_1 e_{tr} = 0, \quad (21)$$

$$\dot{e}_{ck} + T_3 e_{ck} = 0. \quad (22)$$

Первая и вторая производные по времени от выражения (19), вычисленные в силу уравнений (1), (2), (6), (7), (17), равны

$$\begin{aligned}\dot{e}_{tr} &= (2A_1 Y + A_2) R(y)x - (2A_1 Y_m + A_2) R(y_m)x_m + \\ &+ B_1 z_2 + \dots + B_{n_{tr}-1} z_{n_{tr}} + B_{n_{tr}} (A_1 Y y + A_2 y - \\ &- A_1 Y_m y_m - A_2 y_m),\end{aligned}\quad (23)$$

$$\begin{aligned}\ddot{e}_{tr} &= 2A_1 \dot{Y} R(y)x + (2A_1 Y + A_2) (\dot{R}(y)x + R(y)\dot{x}) - \\ &- 2A_1 \dot{Y}_m R(y_m)x_m - (2A_1 Y_m + A_2) (\dot{R}(y_m)x_m + \\ &+ R(y_m)\dot{x}_m) + B_1 z_3 + \dots + B_{n_{tr}-2} z_{n_{tr}} + \\ &+ B_{n_{tr}-1} (A_1 Y y + A_2 y - A_1 Y_m y_m - A_2 y_m) + \\ &+ B_{n_{tr}} ((2A_1 Y + A_2) R(y)x - (2A_1 Y_m + A_2) R(y_m)x_m).\end{aligned}\quad (24)$$

Первая производная по времени от выражения (20), вычисленная в силу уравнений (1), (2), (6), (7), (17),

$$\begin{aligned}\dot{e}_{ck} &= A_4 \dot{x} - A_4 \dot{x}_m + C_1 \chi_2 + \dots \\ &\dots + C_{n_{ck}-1} \chi_{n_{ck}} + C_{n_{ck}} (A_4 x - A_4 x_m).\end{aligned}\quad (25)$$

Подставив выражения (16), (19), (20), (23)–(25) в уравнения (21), (22), получим

$$\begin{bmatrix} (2A_1 Y + A_2) R(y) \\ A_4 \end{bmatrix} \dot{x} = - \begin{bmatrix} T_2(\psi_{tr} + B_1 z_2 + \dots + B_{n_{tr}-1} z_{n_{tr}} + B_{n_{tr}}(\psi_{tr} - \psi_{trm})) + T_1(\psi_{tr} + B_1 z_1 + \dots + B_{n_{tr}} z_{n_{tr}}) + f_2 \\ T_3(\psi_{ck} + C_1 \chi_1 + \dots + C_{n_{ck}-1} \chi_{n_{ck}}) + C_1 \chi_2 + \dots + C_{n_{ck}-1} \chi_{n_{ck}} + C_{n_{ck}} (A_4 x - A_4 x_m) \end{bmatrix}, \quad (26)$$

$$f_2 = 2A_1 \dot{Y} R(y)x + (2A_1 Y + A_2) \dot{R}(y)x + B_1 z_3 + \dots + B_{n_{tr}-2} z_{n_{tr}} + B_{n_{tr}-1} (\psi_{tr} - \psi_{trm}) + B_{n_{tr}} (\dot{\psi}_{tr} - \dot{\psi}_{trm}).$$

Как и для эталонной модели, примем

$$F_u = K_\delta u, \quad (27)$$

где K_δ — матрица размерности $6 \times (\mu + \nu)$.

Из уравнения (26), с учетом уравнений (2), (27), находим выражение для вектора управляющих воздействий:

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix} (2A_1 Y + A_2) R(y) \\ A_4 \end{bmatrix} M^{-1} K_\delta u = - \begin{bmatrix} (2A_1 Y + A_2) R(y) \\ A_4 \end{bmatrix} M^{-1} F_d - \\ &- \begin{bmatrix} T_2(\dot{\psi}_{tr} + B_1 z_2 + \dots + B_{n_{tr}-1} z_{n_{tr}} + B_{n_{tr}}(\dot{\psi}_{tr} - \dot{\psi}_{trm})) + T_1(\dot{\psi}_{tr} + B_1 z_1 + \dots + B_{n_{tr}} z_{n_{tr}}) + \dot{f}_2 \\ T_3(\dot{\psi}_{ck} + C_1 \chi_1 + \dots + C_{n_{ck}-1} \chi_{n_{ck}}) + C_1 \chi_2 + \dots + C_{n_{ck}-1} \chi_{n_{ck}} + C_{n_{ck}} (A_4 \dot{x} - A_4 \dot{x}_m) \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (28)$$

Выражение (28) описывает векторный позиционно-траекторный регулятор, обеспечивающий управление подвижным объектом (1), (2).

Анализ устойчивости желаемого положения равновесия (4), (5), (8), (9) осуществляется с помощью квадратичной функции

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_{ck}^T e_{ck} + e_{tr}^T T_1 e_{tr} + \frac{1}{2} \dot{e}_{tr}^T \dot{e}_{tr} + \frac{1}{2} (\dot{e}_{tr} + T_2 e_{tr})^T (\dot{e}_{tr} + T_2 e_{tr}), \quad (29)$$

где V_1 описывается выражением (15).

Производная по времени от функции (29), вычисленная в силу уравнений замкнутой системы,

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - e_{ck}^T T_3 e_{ck} - e_{tr}^T T_1 T_2 e_{tr} - \dot{e}_{tr}^T T_2 \dot{e}_{tr},$$

где $\dot{V}_1$ определяется выражением (16).

Из проведенного анализа следует, что асимптотически устойчивое положение равновесия системы определяется выражениями

$$e_{ck} = 0_{v \times 1}, \quad e_{tr} = 0_{\mu \times 1}, \quad \dot{e}_{tr} = 0_{\mu \times 1}, \quad \psi_{ckm} = 0_{v \times 1}, \quad \psi_{trm} = 0_{\mu \times 1}, \quad \dot{\psi}_{trm} = 0_{\mu \times 1}, \quad (30)$$

где $0_{v \times 1}$, $0_{\mu \times 1}$ — нулевые векторы размерностью, указанной их индексами.

Из выражений (19), (30) следует, что в положении равновесия (30)

$$\psi_{tr} = -B_1 z_1 - \dots - B_{n_{tr}} z_{n_{tr}}. \quad (31)$$

Подставив выражение (31) в систему (17), получим

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2, \quad \dot{z}_2 = z_3, \quad \dots, \quad \dot{z}_{n_{tr}} = \\ &= -B_1 z_1 - \dots - B_{n_{tr}} z_{n_{tr}}. \end{aligned} \quad (32)$$

Матрицы B_j , $j = \overline{1, n_{tr}}$, выбираются так, чтобы система (32) была асимптотически устойчивой.

В частности, если матрицы B_j , $j = \overline{1, n_{tr}}$, диагональные, то система (32) распадается на μ подсистем, каждая из которых имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{z}_{1i} &= z_{2i}, \quad \dot{z}_{2i} = z_{3i}, \quad \dots, \quad \dot{z}_{n_{tr}i} = \\ &= -B_{1(i,i)} z_{1i} - \dots - B_{n_{tr}(i,i)} z_{n_{tr}i}, \end{aligned}$$

где z_{ji} , $j = \overline{1, n_{tr}}$, $i = \overline{1, \mu}$ — элементы векторов z_j ; $B_{j(i,i)}$ — диагональные элементы матриц B_j .

В этой связи из системы (32) следует, что ее асимптотически устойчивое положение равновесия

определяется выражением $z_1 = z_2 = z_3 = \dots = z_{n_{tr}} = 0_{\mu \times 1}$, с учетом которого из выражения (31) следует $\psi_{tr} = 0_{\mu \times 1}$.

Аналогичным образом, с учетом формул (18) и (20) показывается, что из выражения (30) следует $\psi_{ck} = 0_{v \times 1}$.

Из уравнений замкнутой системы (10), (11), (17), (18), (21) и (22) получаем собственную матрицу блочного вида

$$A_z = \begin{bmatrix} A_{z1} & 0 & 0 \\ 0 & A_{z2} & 0 \\ 0 & 0 & A_{z3} \end{bmatrix},$$

$$A_{z1} = \begin{bmatrix} Ip & -I & 0 \\ T_1 & Ip + T_2 & 0 \\ 0 & 0 & Ip + T_3 \end{bmatrix},$$

$$A_{z2} = \begin{bmatrix} Ip & -I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ T_1 & Ip + T_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ip & -I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Ip & -I & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -I & 0 & B_1 & B_2 & \dots & Ip + B_{n_{tr}} \end{bmatrix},$$

$$A_{z3} = \begin{bmatrix} Ip + T_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Ip & -I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Ip & -I & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -I & C_1 & C_2 & \dots & Ip + C_{n_{ck}} \end{bmatrix},$$

где p — переменная преобразования Лапласа, I — единичная матрица.

Отсюда следует, что характеристическое уравнение замкнутой системы представляется в виде произведения полиномов

$$\begin{aligned} D &= (Ip^2 + T_2 p + T_1)(Ip + T_3)(Ip^2 + T_2 p + T_1) \times \\ &\times (Ip + T_3)(Ip^{n_{tr}} + B_{n_{tr}} p^{n_{tr}-1} + \dots + B_1 p + B_0) \times \\ &\times (Ip^{n_{ck}} + C_{n_{ck}} p^{n_{ck}-1} + \dots + C_1 p + C_0). \end{aligned} \quad (33)$$

Таким образом, характеристическое уравнение замкнутой системы представляет собой произведение характеристических уравнений эталонной системы по каналам управления траекторией и скоростью, уравнения основного контура и уравнений обеспечения астатизма. Это позволяет проводить



независимую настройку каналов управления скоростью и траекторией подвижного объекта, эталонной модели и контура обеспечения астатизма.

С целью проверки астатизма системы по каналу скорости добавим в уравнения (11), (18), (20) и (22) вектор задающих воздействий g_{ck} :

$$(Ip + T_3)(\psi_{ck} - \psi_{ckm} + C_1\chi_1 + \dots + C_{n_{ck}}\chi_{n_{ck}}) = - (Ip + T_3)g_{ck},$$

$$(Ip + T_3)\psi_{ckm} = (Ip + T_3)g_{ck},$$

$$p\chi_1 = \chi_2, \quad p\chi_2 = \chi_3, \quad p\chi_{n_{ck}} = \psi_{ck} - \psi_{ckm}.$$

После преобразований получим

$$\begin{aligned} (Ip^{n_{ck}} + C_{n_{ck}}p^{n_{ck}-1} + \dots + C_1p_1 + C_0)\psi_{ck} = \\ = (C_{n_{ck}}p^{n_{ck}-1} + \dots + C_1p_1 + C_0)\psi_{ckm}, \end{aligned}$$

откуда следует, что замкнутая система обладает порядком астатизма $n_{ck} - 1$ по отношению к сигналу эталонной модели ψ_{ckm} .

Аналогичным образом получаем уравнение «вход — выход» замкнутой системы по каналу управления траекторией

$$\begin{aligned} (Ip^{n_{tr}} + B_{n_{tr}}p^{n_{tr}-1} + \dots + B_1p_1 + B_0)\psi_{tr} = \\ = (B_{n_{tr}}p^{n_{tr}-1} + \dots + B_1p_1 + B_0)\psi_{trm}, \end{aligned}$$

из которого следует, что замкнутая система обладает порядком астатизма $n_{tr} - 1$ по отношению к сигналу эталонной модели ψ_{trm} .

Адаптация алгоритма управления (28) осуществляется посредством параметрической настройки матриц B_j и C_k , $j = \overline{1, n_{tr}}$, $k = \overline{1, n_{ck}}$. Если выбрать матрицы B_j и C_k диагональными, то их начальные значения можно получить методом стандартных переходных функций [25]. В этом случае последние два полинома в выражении (33) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} D_1 &= Ip^{n_{tr}} + B'_{n_{tr}}\Omega_{0tr}p^{n_{tr}-1} + \dots \\ &\dots + B'_1\Omega_{0tr}^{n_{tr}-1}p + B'_0\Omega_{0tr}^{n_{tr}}, \\ D_2 &= Ip^{n_{ck}} + C'_{n_{ck}}\Omega_{0ck}p^{n_{ck}-1} + \dots \\ &\dots + C'_1p\Omega_{0ck}^{n_{tr}-1} + C'_0\Omega_{0ck}^{n_{tr}}, \end{aligned}$$

где B'_j и C'_k , $j = \overline{1, n_{tr}}$, $k = \overline{1, n_{ck}}$ — диагональные матрицы размерности $n_{tr} \times n_{tr}$ и $n_{ck} \times n_{ck}$, элементы которых определяются выбранным распределением корней (биномиальным, оптимальным); Ω_{0tr} и Ω_{0ck} — диагональные матрицы размерности $n_{tr} \times n_{tr}$ и $n_{ck} \times n_{ck}$, элементы которых являются среднегеометрическими корнями.

В данной статье предлагается осуществлять параметрическую адаптацию матриц геометрических корней Ω_{0tr} и Ω_{0ck} . Это позволяет свести настройку коэффициентов полинома высокого порядка к настройке одного коэффициента. Например, применяя известные алгоритмы настройки [26], получаем

$$\dot{\Omega}_{0tr} = G_{tr}z_1^T e_{tr}, \quad \dot{\Omega}_{0ck} = G_{ck}z_1^T e_{ck}, \quad (34)$$

где G_{tr} и G_{ck} — матрицы постоянных коэффициентов настройки размерности $\mu \times 1$ и $\nu \times 1$.

Пусть, например, $n_{tr} = n_{ck} = 2$, распределение корней стандартного полинома биномиальное, тогда коэффициенты находятся из соотношений $B_1 = \Omega_{0tr}^2$, $C_1 = \Omega_{0ck}^2$, $B_2 = 2\Omega_{0tr}$, $C_2 = 2\Omega_{0ck}$.

Структурная схема системы управления подвижного объекта с эталонной моделью представлена на рис. 1. Как видно, эталонная модель не входит в основной контур управления. В ней матрицы T_1 , T_2 и T_3 постоянные. В работе [27] предложен вариант настройки матриц T_1 , T_2 и T_3 таким образом, чтобы управляющие воздействия u не выходили в насыщение.

4. АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ

Выражение (28) для вычисления управляющего воздействия содержит неопределенный вектор F_d и матрицы интервальных параметров M и K_δ . Для оценки аддитивных возмущений представим уравнение (2) динамики подвижного объекта в виде

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (M_m + \Delta M)^{-1}((\Delta K_{\delta m} + \Delta K_\delta)u + F_{dm} + \Delta F_d) = \\ &= F_{xm} + \Delta F_x, \end{aligned} \quad (35)$$

где ΔM , ΔK_δ , ΔF_d — неопределенные матрицы и вектор, $F_{xm} = (M_m)^{-1}(K_{\delta m}u + F_{dm})$ — известный вектор, $\Delta F_x = M_m^{-1}(\Delta K_\delta u + \Delta F_d) + \Delta M^{-1}((K_{\delta m} + \Delta K_\delta)u + F_{dm} + \Delta F_d)$ — неизвестный вектор.

Для синтеза наблюдателя вектора ΔF_x воспользуемся подходом, предложенным в работах [24, 28]. В этом подходе реализован редуцированный

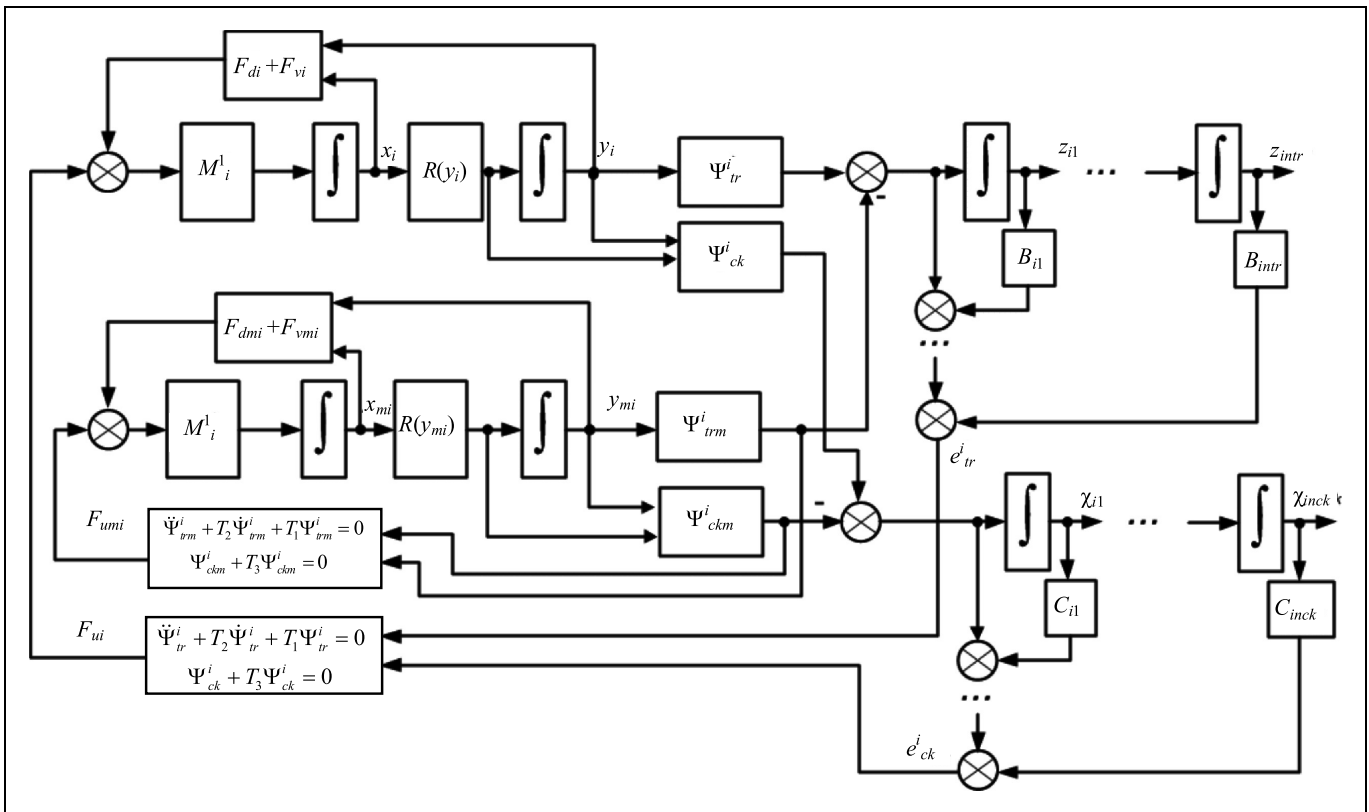


Рис. 1. Схема адаптивной системы управления с астатизмом

наблюдатель Луенбергера [29], робастность которого обеспечивается аппроксимацией возмущений временными рядами [30]. В соответствии с методикой синтеза [28] ошибка наблюдателя формируется в виде

$$e_n = \Delta F_x - s(x) - \lambda, \quad (36)$$

где λ — вектор переменных наблюдателя, $s(x)$ — векторная функция, определяемая далее.

Потребуем, чтобы ошибка (36) удовлетворяла дифференциальному уравнению $\dot{e}_n + T_n e_n = 0$, где T_n — матрица, выбираемая из условий устойчивости и быстродействия. Для простоты изложения примем матрицу T_n скалярной, т. е. диагональной с одинаковыми элементами [31].

Дифференцируя ошибку (36) по времени в силу уравнения (35), из последнего уравнения получим

$$-\dot{\lambda} - \frac{\partial s(x)}{\partial x} (F_{xm} + \Delta F_x) + T_n (\Delta F_x - s(x) - \lambda) = 0.$$

Приравняв к нулю все слагаемые, содержащие неизвестный вектор ΔF_x , получим

$$\dot{\lambda} = -T_n \lambda - T_n T_n x - T_n F_{xm}, \quad \Delta \hat{F}_x = T_n x + \lambda. \quad (37)$$

Переходя в уравнениях (35) и (37) к изображениям по Лапласу, находим

$$\begin{cases} px = F_{xm} + \Delta F_x, \\ p\lambda = -T_n \lambda - T_n T_n x - T_n F_{xm}, \\ \Delta \hat{F}_x = T_n x + \lambda, \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \begin{cases} x = \frac{F_{xm} + \Delta F_x}{p}, \\ \lambda = \frac{-T_n T_n x - T_n F_{xm}}{Ip + T_n}, \\ \Delta \hat{F}_x = T_n x + \lambda, \end{cases} \Rightarrow \Delta \hat{F}_x = \\ = T_n \frac{F_{xm} + \Delta F_x}{p} - \frac{T_n T_n}{Ip + T_n} \frac{F_{xm} + \Delta F_x}{p} - \frac{T_n F_{xm}}{Ip + T_n} \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta \hat{F}_x = \frac{T_n}{Ip + T_n} \Delta \hat{F}_x. \end{aligned}$$

Применив метод коэффициентов ошибок [32], получим

$$E_0 = 0, \quad E_1 = \frac{1}{T_n}, \quad E_2 = \frac{2}{T_n^2}, \quad \dots, \quad E_i = \frac{i!}{T_n^i}.$$



Тогда ошибка оценивания

$$\varepsilon_n(t) = \frac{1}{T_n} \Delta \dot{F}_x + \frac{1}{T_n^2} \Delta \ddot{F}_x + \dots + \frac{1}{T_n^i} \Delta F_x^{(i)} + \dots$$

Пусть ΔF_x представляет собой линейный сигнал, удовлетворяющий ограничениям (3). Тогда компоненты вектора ошибки оценивания ограничены выражением

$$|\varepsilon_n^i(t)| \leq \Delta \dot{F}_x^{i0} / T_n, \quad i = \overline{1, 6}, \quad (38)$$

которое позволяет выбрать положительно определенную матрицу T_n так, чтобы ошибка оценивания не превышала заданную величину.

Представим оцениваемую функцию гармоническим сигналом $\Delta F_x = A \sin \omega_{\max} t$, тогда

$$|\varepsilon_n^i(t)| \leq \frac{A \omega_{\max}}{T_n} + \frac{A \omega_{\max}^2}{T_n^2} + \dots + \frac{A \omega_{\max}^i}{T_n^i} + \dots$$

Отсюда следует, что для ограниченности ошибки оценивания требуется выбирать элементы матрицы T_n с учетом условия $\omega_{\max} / T_n < 1$.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим подвижный объект с такими характеристиками:

$$A(\psi, \vartheta, \omega) = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & (-\cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma + \sin \psi \sin \gamma) & (\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma) \\ \sin \vartheta & \cos \vartheta \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos \vartheta & (\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma) & (\cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma) \end{bmatrix},$$

$$A_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\cos \gamma}{\cos \vartheta} & -\frac{\sin \gamma}{\cos \vartheta} \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 1 & -\operatorname{tg} \vartheta \cos \gamma & \operatorname{tg} \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A_\omega \end{bmatrix},$$

$$F_d = \begin{bmatrix} m(-g \sin \vartheta - \omega_y V_z + \omega_z V_y) \\ m(-g \cos \vartheta \cos \gamma - \omega_z V_x + \omega_x V_z) \\ m(g \cos \vartheta \sin \gamma - \omega_x V_y + \omega_y V_x) \\ -(J_z - J_y) \omega_y \omega_z \\ -(J_x - J_z) \omega_x \omega_z \\ -(J_y - J_x) \omega_y \omega_x \end{bmatrix} + F_d(t),$$

$$K_{\delta m} = \begin{bmatrix} 1000 \\ 0000 \\ 0000 \\ 0100 \\ 0010 \\ 0001 \end{bmatrix},$$

$$F_u = [P \ N_p]^T, \quad P = [P_x \ 0 \ 0]^T, \quad N_p = [N_x \ N_y \ N_z]^T,$$

$$M_m = \operatorname{diag}([m, m, m, J_x, J_y, J_z]), \quad m = 5 \text{ кг},$$

$$J_x = 10,0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad J_y = J_z = 100,0 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где P и N_p — соответственно главный вектор и главный момент силы тяги двигателей.

Данные уравнения описывают движение подвижного объекта на малых скоростях с движительно-рулевым комплексом, обеспечивающим создание тяги вдоль продольной оси и управляющих моментов относительно трех осей связанной системы координат, например, квадрокоптер, автономный необитаемый подводный аппарат, беспилотный летательный аппарат с неизменяемым вектором тяги двигателей.

В качестве параметрических возмущающих воздействий приняты отклонения элементов номинальной матрицы M_m от элементов реальной матрицы M и отклонения элементов матрицы $K_{\delta m}$ от элементов матрицы K_δ . При моделировании принято:

$$M = 0,7 M_m - \begin{bmatrix} 0,02t & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \\ 0 & 0,02t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,02t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,04t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3t & 0 \\ 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,3t \end{bmatrix},$$

$$K_\delta = \begin{bmatrix} 1,4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1,5 \end{bmatrix} - 0,03 \begin{bmatrix} y_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & y_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_2 \end{bmatrix}.$$

Изменения в матрице M обусловлены расходом топлива и действием неучтенных в модели присоединенных масс [33], а в матрице K_δ — зависимостью тяг движителей от глубины (высоты) движения и неточностями в характеристиках, определяющих зависимость тяг от управляемых переменных дви-

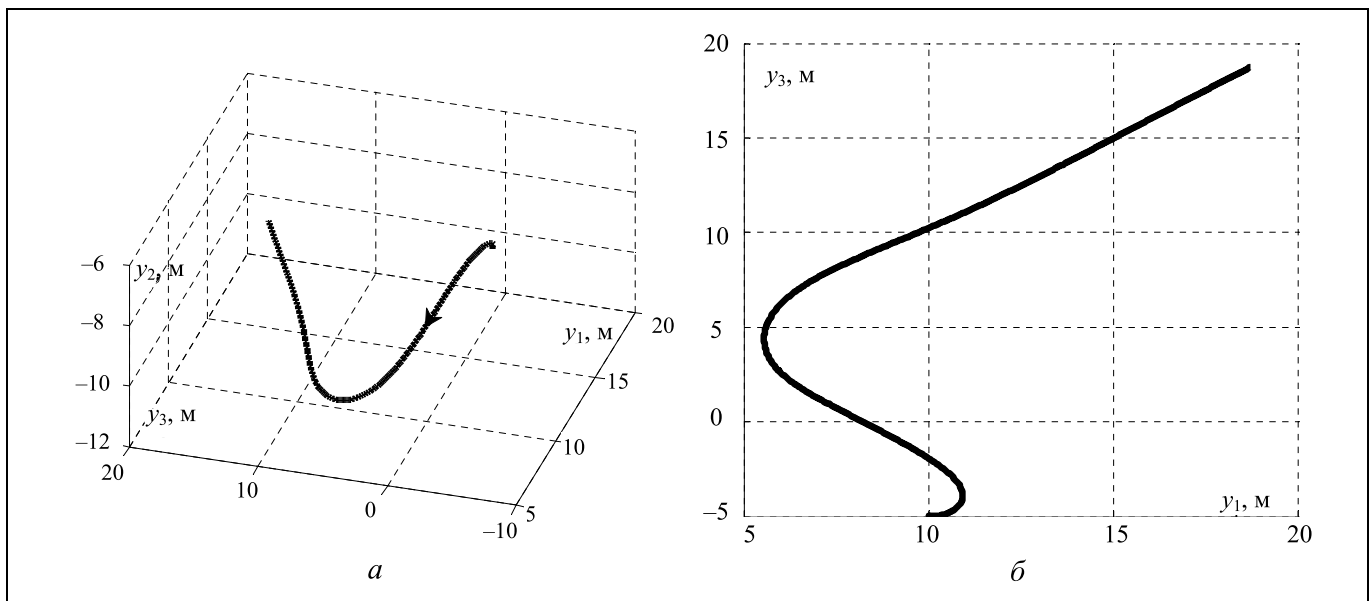


Рис. 2. Траектория движения в трехмерном пространстве (а) и в проекции на плоскость \$OY_1Y_3\$ (б)

жителей. В выражении для управления (28) приняты номинальные значения параметров и вектор оценок возмущений \$M_m, K_{\delta m}, \hat{F}_d\$. Вектор внешних возмущений принят в виде

$$F_d(t) = \begin{bmatrix} 20 + 20\sin(0,8t) \\ 1 \\ 2 \\ -20 - 8\cos(1,3t + 0,2) \\ 16 \\ 40 + 20\sin(t) \end{bmatrix}.$$

Параметры системы управления

$$T_1 = 1, \quad T_2 = 2, \quad T_3 = 1, \quad B_1 = \Omega_{0tr}^2,$$

$$B_2 = 2\Omega_{0tr}, \quad C_1 = \Omega_{0ck}^2, \quad C_2 = 2\Omega_{0ck},$$

$$\Omega_{0ck}(0) = \Omega_{0tr}(0) = 10, \quad T_n = 10,$$

$$A_1 = 0, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} -\Psi^0 \\ -\vartheta^0 \\ -\gamma^0 \end{bmatrix},$$

$$A_4 = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \quad A_5 = -V_x^0,$$

$$\Psi^0 = \begin{cases} \arctg \frac{-a_g}{b_g}, & \text{если } r^0 > r_r, \\ \frac{r^0}{r_r} \left(\arctg \frac{-a_g}{b_g} - \arctg \frac{b_g}{a_g} \right) + \arctg \frac{b_g}{a_g}, & \text{если } r^0 \leq r_r, \end{cases}$$

где \$r^0\$ — расстояние до заданной траектории в плоскости \$OY_1Y_3\$, описываемой уравнением \$a_g y(1) + b_g y(3) + c_g = 0\$; \$r_r\$ — расстояние, при превышении которого вектор скорости подвижного объекта направлен на ближайшую точку на заданной траектории. Если расстояние до траектории меньше \$r_r\$, то подвижный объект начинает разворачиваться вдоль траектории. При моделировании задано \$r_r = 5\$, \$a_g = 1\$, \$b_g = -1\$, \$c_g = 0\$, \$\vartheta^0 = -k_\vartheta(y_2 - y_2^0)\$, \$\gamma^0\$ и \$V_x^0\$ — желаемые значения угла рысканья и скорости: \$\gamma^0 = 0\$, \$V_x^0 = 1\$, \$k_\vartheta = 0,2\$.

На рис. 2 и 3 представлены результаты моделирования адаптивной системы управления (1), (2), (6), (7), (14), (28), (34), (37) при \$G_{tr} = G_{ck} = 3\$.

На рис. 2, а представлена траектория в трехмерном пространстве, из которой видно, что подвижный объект совершает маневр, двигаясь одновременно на заданную глубину и к заданной прямой, после чего выходит на требуемую траекторию и движется с желаемой скоростью.

Результаты численных исследований различных вариантов адаптации сведены в таблице, в которой представлены статические ошибки по скорости и глубине движения. Из таблицы следует, что параметрические возмущения успешно подавляются всеми представленными алгоритмами. Отметим, что параметры объекта нестационарные и изменяются в широких пределах. Внешние возмущения подавляются с конечными ошибками. Так-

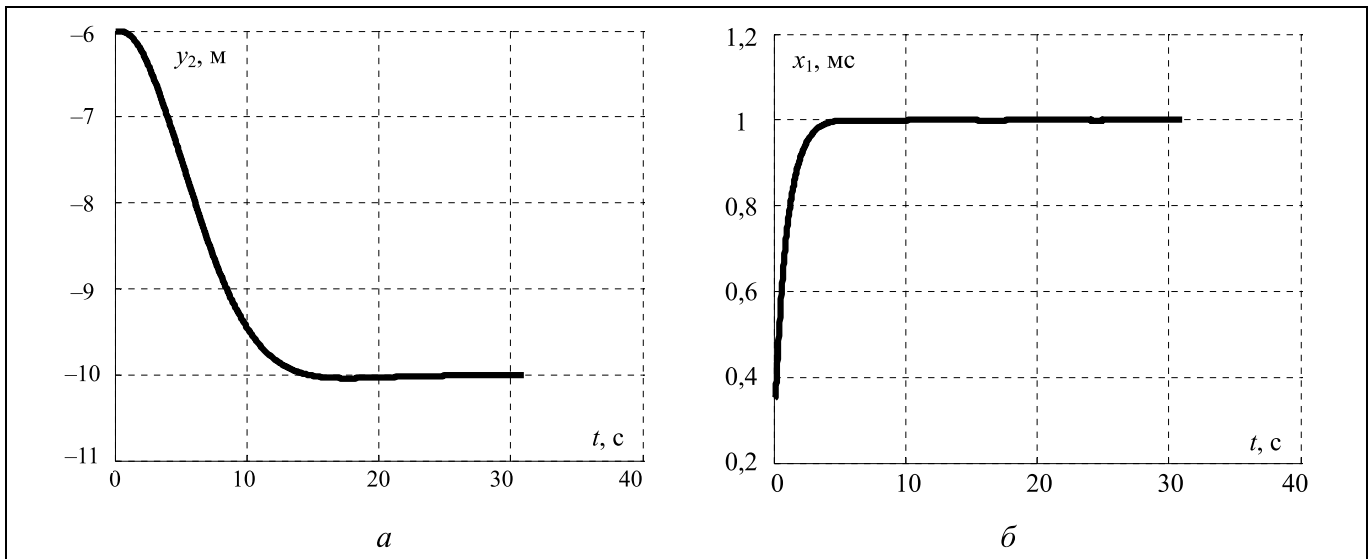


Рис. 3. Глубина (а) и скорость (б) подвижного объекта

же видно, что одновременное применение всех способов адаптации обеспечивает наибольшую точность замкнутой системы.

Наибольшую погрешность при подавлении внешних возмущений и совокупности внешних и параметрических возмущений показывает алгоритм, применяющий только оценивание возмущений. Это связано с тем, что астатизм по каждому каналу обеспечивается динамической системой второго порядка, а оценивание возмущений — наблюдателем первого порядка. Вместе с тем отметим, что применение наблюдателя как дополнительного контура адаптации позволяет существенно (от 50 до 1000 %) уменьшить статическую ошибку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены алгоритмы комбинированной системы управления, содержащей контуры обеспечения астатизма, оценивания возмущений и параметрической адаптации. Предложенная система управления отличается структурой, обеспечивающей автономное функционирование каждого контура, что позволяет настраивать их независимо. При этом параметрическая адаптация и астатизм замкнутой системы обеспечиваются одними и теми же коэффициентами регулятора. Еще одно отличие разработанных алгоритмов состоит в том, что благодаря настройке только среднегеометри-

Сравнительный анализ вариантов адаптации

Вид адаптации	Возмущения					
	параметрические		внешние		параметрические и внешние	
	Статическая ошибка, %					
	по скорости	по траектории	по скорости	по траектории	по скорости	по траектории
Управление с наблюдателем (37)	0	0	0,25	0,02	0,25	0,02
Управление (31)	0	0	0,02	0,001	0,0203	0,0012
Управление (31) с наблюдателем (38)	0	0	0,0016	0,00011	0,0016	0,00011
Управление (31) с настройкой коэффициентов (34)	0,0	0,0	0,0023	0,0004	0,003	0,0002
Управление (31) с настройкой коэффициентов (34) и наблюдателем (37)	0,0	0,0	0,0016	0,00011	0,0016	0,00011

ческого корня предложенный алгоритм параметрической адаптации позволяет свести векторную задачу к скалярному случаю и не изменяет заданного соотношения между корнями характеристического полинома замкнутой системы. Одновременное применение алгоритмов оценивания возмущений, обеспечения астатизма и параметрической адаптации приводит к уменьшению ошибки замкнутой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рутковский В.Ю. Работы Института проблем управления в области беспоисковых адаптивных систем и систем управления космическими аппаратами // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 6. — С. 42—49.
2. Земляков С.Д., Рутковский В.Ю. О некоторых результатах развития теории и практики применения беспоисковых адаптивных систем // Автоматика и телемеханика. — 2001. — № 7. — С. 103—121.
3. Клейман Е.Г. Идентификация нестационарных объектов // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 10. — С. 3—45.
4. Клейман Е.Г. Идентификация входных сигналов в динамических системах // Автоматика и телемеханика. — 1999. — № 12. — С. 3—15.
5. Рутковский В.Ю., Крутова И.Н. Принцип построения и некоторые вопросы теории одного класса самонастраивающихся систем с моделью // Тр. I Всесоюзной конф. по теории и практике самонастраивающихся систем. — М., 1965. — С. 46—63.
6. Рутковский В.Ю., Скорин-Чайков В.Н. Самонастраивающиеся системы с пробным сигналом // Тр. I Всесоюзной конф. по теории и практике самонастраивающихся систем. — М., 1965. — С. 93—111.
7. Zemlyakov S.D. Some problem of analytical synthesis in model reference control systems by the direct method of Lyapunov. Theory of self adaptive control system // Proc. of Intern. Symposium, England, Teddington, 1965. — N.-Y.: P.N. Hummon Plenum Press, 1966. — P. 175—179.
8. Dan Zhang, Bin Wei. A review on model reference adaptive control of robotic manipulators // Annual Reviews in Control. — 2017. — Vol. 43. — P. 188—198.
9. Дружинина М.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. — 1996. — № 2. — С. 3—33.
10. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Адаптивное управление летательным аппаратом с идентификацией на скользящих режимах // Управление большими системами. — 2009. — Вып. 26. — С. 113—144.
11. Бушманова Ю.А. Комбинированное управление скалярными нестационарными объектами в системах с неявным эталоном // Информатика и системы управления. — 2007. — № 2. — С. 165—172.
12. Рутковский В.Ю., Глузов В.М. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. I // Автоматика и телемеханика. — 2017. — № 4. — С. 92—105.
13. Рутковский В.Ю., Глузов В.М. Особенности динамики адаптивной системы управления с нелинейной эталонной моделью. II // Там же. — № 5. — С. 83—95.
14. Даденков Д.А., Казанцев В.П. Синтез электромеханических систем управления с нелинейной адаптивной эталонной моделью // Фундаментальные исследования. — 2014. — № 11. — С. 1466—1471.
15. Еремин Е.Л. Модификация адаптивной системы для управления одноканальным объектом с входным насыщением // Информатика и системы управления. — 2016. — № 3 (49). — С. 119—131.
16. Еремин Е.Л., Пикун З.Д., Теличенко Д.А. Адаптивная система управления одним классом структурно-параметрически неопределенных объектов в схеме с явной и неявной эталонными моделями // Информатика и системы управления. — 2015. — № 1 (43). — С. 105—114.
17. Фуртат И.Б., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектами с неизвестной относительной степенью // Автоматика и телемеханика. — 2010. — № 6. — С. 109—118.
18. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Крухмалев В.А. Базовые алгоритмы адаптивного позиционно-траекторного управления подвижными объектами при позиционировании в точке // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2015. — № 4 (16). — С. 219—225.
19. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В. Алгоритмы адаптивных позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами // Проблемы управления. — 2015. — № 4. — С. 66—74.
20. Медведев М.Ю., Рогов В.А., Медведева Т.Н. Позиционно-траекторное управление подвижными объектами с многоконтурной адаптацией // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2016. — № 7. — С. 101—114.
21. Isidori A. Nonlinear Control Systems. — Springer Verlag, 1999.
22. Бурдаков С.Ф., Мирошник И.В., Стельмаков Р.Э. Системы управления движением колесных роботов / Сер. Анализ и синтез нелинейных систем. — СПб.: Наука, 2001.
23. Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В. Динамика самолета. Пространственное движение. — М.: Машиностроение, 1983.
24. Пишихов В.Х., Медведев М.Ю., Гайдук А.Р., и др. Система позиционно-траекторного управления роботизированной воздухоплавательной платформой: алгоритмы управления // Мехатроника, автоматизация и управление. — 2013. — № 7. — С. 13—20.
25. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1972.
26. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. — М.: Высшая школа, 1989. — 263 с.
27. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов, т. 2: учеб. пособие для втузов: 13-е изд. — М.: Наука. 1985. — 560 с.
28. Медведев М.Ю. Алгоритмы адаптивного управления исполнительными приводами // Мехатроника, автоматизация и управление. — 2006. — № 6. — С. 17—22.
29. Vucy R. Nonlinear filtering theory // IEEE Trans. on Automat. Control. — 1965. — Vol. AC-1, N 2. — P. 198.
30. Красовский А.А. Циклическое оценивание при первичной обработке сигналов датчиков // Автоматика и телемеханика. — 1987. — № 4. — С. 52—60.
31. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц: 5-е изд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 560 с.
32. Теория автоматического управления: уч. для вузов. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления / Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др.; под ред. А.А. Воронова: 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 1986. — 367 с.
33. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики: 3-е изд. — М.: Наука, 1980.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Ю. Рутковским.

Пишихов Вячеслав Хасанович — д-р техн. наук, директор НИИ робототехники и процессов управления, pshichop@rambler.ru,

Медведев Михаил Юрьевич — д-р техн. наук, профессор, medvmihal@sfsedu.ru,

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону.

СТОХАСТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ МАНЕВРОМ ОБХОДА ГРУППЫ ПОДВИЖНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ОБЛАСТЕЙ¹

С.В. Соколов, Л.В. Сахарова, А.А. Манин

Решена задача стохастического управления маневром подвижного объекта, обеспечивающим минимальную вероятность его попадания в область действия измерительных средств группы следящих за ним подвижных пунктов сопровождения. Управление подвижным объектом осуществляется на основе апостериорных оценок как вектора его собственного состояния, так и векторов состояния группы пунктов сопровождения, полученных по показаниям измерителей, расположенных непосредственно на борту объекта. Приведен пример, иллюстрирующий эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: подвижный объект, группа пунктов сопровождения, апостериорное оценивание, стохастическое управление, вероятность существования вектора состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальная для подвижных объектов (ПО), функционирующих в условиях неопределенности, задача синтеза стохастического управления, обеспечивающего минимальную вероятность пересечения границ заданной пространственной области, на сегодня решена только для случая постоянных *a priori* известных границ последней [1–3]. В то же время в ряде практически важных случаев границы запрещенной целевой области могут изменяться во времени заранее неизвестным образом: при вынужденном движении (или дрейфе) пунктов сопровождения (ПС) данного объекта — следящих или управляющих, при незапланированной смене траектории ПС (например, для навигационных спутников), при изменении целевой пространственной области уже в процессе движения ПО, при преодолении объектом подвижных зон направленных помех (отслеживающих движение объекта) и др.

Более того, при наличии нескольких ПС, функционирующих одновременно и независимо друг от друга, запрещенных областей с подвижными центрами может быть несколько, причем в общем случае эти области пересекаются.

Решение подобной задачи требует уже иных подходов, среди которых наибольшее распространение получили игровые [4, 5]. Но сложность реализации в общем случае существующих в настоя-

щее время игровых алгоритмов в бортовых вычислителях не позволяет обеспечить их практическое применение в многомерных динамических объектах, приводя к необходимости разработки новых методов управления, ориентированных на конкретный характер движения ПО и его ПС, а также алгоритмов их взаимодействия. Отметим, что в игровой постановке случай одновременного и пересекающегося взаимодействия сразу нескольких независимых игроков до настоящего времени не рассматривался.

В связи с этим рассмотрим далее один из возможных путей решения подобной задачи, сделав допущения:

— управление ПО осуществляется на основе апостериорных оценок как вектора его собственного состояния X , так и векторов состояния каждого i -го, $i = 1, \dots, M$, ПС Y_i , полученных по показаниям измерительного комплекса (ИК), расположенного непосредственно на борту ПО;

— каждый i -й ПС имеет свой ИК, который обеспечивает получение точной информации о параметрах состояния ПО;

— сопровождение ПО осуществляется всеми независимыми друг от друга ПС по законам, линейно зависящим как от вектора скорости параметров состояния ПО, так и от самого вектора состояния ПО (как показано далее, линейный характер указанной зависимости не оказывает принципиального влияния на методику решения задачи и используется далее лишь для наглядности процедуры формирования искомого закона управления).

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания № 1.11772.2018/11.12.

Опираясь на перечисленные допущения, вытекающие из реальных условий практического применения большинства известных комплексов сопровождения ПО, дадим постановку описанной задачи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть N -мерный вектор состояния X сопровождаемого ПО описывается стохастическим нелинейным дифференциальным уравнением:

$$\dot{X} = f(X, t) + f_0(X, t)U(\hat{X}, \hat{Y}, t) + f_1(X, t)\xi, \quad (1)$$

$$X_0 = X(t_0),$$

где f , f_0 и f_1 — известные нелинейные векторная и матричные функции размерности, соответственно, N , $N \times N$ и $N \times L$; ξ — L -мерный белый нормированный гауссовский вектор-шум; $U(\hat{X}, \hat{Y}, t)$ — искомый N -мерный вектор управления, формируемый на основе апостериорных оценок векторов состояния ПО $\hat{X}$ и ПС $\hat{Y} = [\hat{Y}_1^T \ \hat{Y}_2^T \ \dots \ \hat{Y}_q^T]^T$ и зависящий только от них, а N -мерный вектор состояния i -го ПС Y_i , соответственно:

$$\dot{Y}_i = \Phi_i(Y_i, t) + \alpha_i(t)\Phi_{0_i}(Y_i, t)\dot{X} + \beta_i(t)\Phi_{1_i}(Y_i, t)X + \Phi_{2_i}(Y_i, t)\zeta_i, \quad Y_i = Y_i(t_0), \quad (2)$$

где Φ_i , Φ_{0_i} , Φ_{1_i} и Φ_{2_i} — известные, определяемые физико-техническими особенностями i -го ПС нелинейные векторные и матричные функции размерности соответственно N , $P_1 \times N$, $P_2 \times N$, $N \times K$; α_i , β_i — известные временные матричные функции, определяющие динамику сопровождения ПО, размерности соответственно $N \times P_1$, $N \times P_2$; ζ_i — K -мерный белый нормированный гауссовский вектор-шум, $i = 1, \dots, q$; при формировании вектора состояния i -го ПС в соответствии с уравнением (2) принимается допущение, что векторы $\dot{X}$, X при организации процесса сопровождения для каждого i -го ПС известны точно.

Движение i -го независимого ПС наблюдается измерительным комплексом ПО с помощью i -й группы соответствующих датчиков внешней измерительной информации, вектор выходных сигналов Z_{0_i} которых описывается в общем случае нелинейным стохастическим уравнением:

$$Z_{0_i} = H_{0_i}(Y_i, t) + W_{0_i}, \quad i = 1, \dots, q, \quad (3)$$

где H_{0_i} — известная нелинейная вектор-функция размерности S_{0_i} , определяемая типом применяемых датчиков внешней информации; W_{0_i} — белый

гауссовский центрированный вектор-шум размерности S_{0_i} с матрицей интенсивности D_{0_i} . Одновременно ИК подвижного объекта позволяет наблюдать параметры собственного движения с помощью, например, автономных измерителей, описываемых нелинейным уравнением:

$$Z_1 = H_1(X, t) + W_1, \quad (4)$$

где Z_1 — вектор выходных сигналов измерителей параметров собственного движения ПО размерности S_1 ; H_1 — известная нелинейная вектор-функция измерения размерности S_1 ; W_1 — белый гауссовский центрированный вектор-шум размерности S_1 с матрицей интенсивности D_1 , определяемой уровнем помехи измерения параметров состояния ПО.

Очевидно, что использование информации, содержащейся в уравнениях (1)–(4), позволяет применять для определения текущего состояния как ПО, так и любого i -го ПС, существующий аппарат теории стохастического оценивания [6]. Для возможности его эффективного применения предварительно сделаем следующие построения. Совокупность наблюдений (3), (4) представим в виде единого (обобщенного), наблюдателя

$$Z_i = H_i(X, Y_i, t) + W_i,$$

где Z_i — вектор выходных сигналов обобщенного наблюдателя — датчиков измерительного комплекса ПО — размерности $S_i = S_1 + S_{0_i}$; H_i — известная нелинейная вектор-функция наблюдения; W_i — центрированный белый гауссовский вектор-шум с матрицей интенсивности D_i , $i = 1, \dots, q$. Также объединим уравнения (1), (2) в единую систему, выразив вектор $\dot{X}$ в правой части (2) с помощью его представления (1):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y}_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} f(X, t) \\ \Psi_i(X, Y_i, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_0(X, t) \\ \Psi_{0_i}(X, Y_i, t) \end{bmatrix} U(\hat{X}, \hat{Y}, t) + \\ &+ \Psi_{1_i}(X, Y_i, t) \begin{bmatrix} \xi \\ \zeta_i \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Psi_i(X, Y_i, t) &= \Phi_i(Y_i, t) + \alpha_i(t)\Phi_{0_i}(Y_i, t)f(X, t) + \\ &+ \beta_i(t)\Phi_{1_i}(Y_i, t)X, \end{aligned}$$

$$\Psi_{0_i}(X, Y_i, t) = \alpha_i(t)\Phi_{0_i}(Y_i, t)f_0(X, t),$$

$$\Psi_{1_i}(X, Y_i, t) = \begin{bmatrix} f_1(X, t) & \vdots & 0 \\ \dots & \vdots & \dots \\ \alpha_i(t)\Phi_{0_i}(Y_i, t)f_1(X, t) & \vdots & \Phi_{2_i}(Y_i, t) \end{bmatrix},$$

$$i = 1, \dots, q.$$



Из всех существующих алгоритмов оценивания наибольшее практическое распространение получили алгоритмы на основе расширенного нелинейного (обобщенного) фильтра Калмана [6], что обусловлено прежде всего тем, что они позволяют осуществлять оценку динамических объектов произвольной размерности, а также тем, что принятое при его синтезе предположение о гауссовости апостериорной плотности вероятности (АПВ) вектора состояния обеспечивает максимальную точность оценивания последнего при минимуме информации о параметрах состояния (т. е. в условиях максимальной априорной неопределенности) [7]. Применяя для оценки расширенного вектора $(X, Y_i)^T$ алгоритм обобщенного фильтра Калмана [6], имеем:

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y}_i \end{bmatrix} = \Phi_i + \Phi_{0_i} U + K_i(Z_i - H_i),$$

$$K_i = R_i \left[\frac{\partial H_i}{\partial \hat{X}} : \frac{\partial H_i}{\partial \hat{Y}_i} \right]^T D_{W_i}^{-1},$$

$$\begin{aligned} \dot{R}_i &= G_i + \left(\frac{\partial \Phi_{0_i}}{\partial (\hat{X}, \hat{Y}_i)^T} \hat{\otimes} U \right) R_i + R_i \left(\frac{\partial \Phi_{0_i}}{\partial (\hat{X}, \hat{Y}_i)^T} \hat{\otimes} U \right)^T, \\ i &= 1, \dots, q, \end{aligned}$$

$$G_i = \frac{\partial \Phi_i}{\partial (\hat{X}, \hat{Y}_i)^T} R_i + R_i \frac{\partial \Phi_i^T}{\partial (\hat{X}, \hat{Y}_i)^T} + \Psi_{1_i} \Psi_{1_i}^T - K_i D_{W_i} K_i^T,$$

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} f \\ \Psi_i \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \hat{X}_0 \\ \hat{Y}_{0_i} \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_{0_i} \end{bmatrix},$$

$$R_{0_i} = M \left\{ \left(\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_{0_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{X}_0 \\ \hat{Y}_{0_i} \end{bmatrix} \right) \left(\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_{0_i} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{X}_0 \\ \hat{Y}_{0_i} \end{bmatrix} \right)^T \right\},$$

где R_i — апостериорная ковариационная матрица; $\hat{\otimes}$ — знак блочного умножения матрицы на вектор, $i = 1, \dots, q$. Ввиду того, что дальнейшее решение задачи предполагает операции с вектором параметров АПВ ρ_i , преобразуем матричное уравнение для апостериорной ковариационной матрицы R_i в векторное, воспользовавшись введенной в работе [8] операцией (V) преобразования произвольной матрицы Q размерности $m \times n$ в вектор $Q^{(V)}$:

$$Q^{(V)} = [Q_{11} \ Q_{21} \ \dots \ Q_{m1} \ Q_{12} \ Q_{22} \ \dots \ Q_{m2} \ \dots \ Q_{1n} \ \dots \ Q_{mn}]^T,$$

где Q_{ij} — элементы матрицы Q , а также соответствующими правилами и операциями матричной алгебры, приведенными в Приложении 1. Окончательно имеем:

$$\begin{aligned} (\hat{X}, \hat{Y}_i, \dot{R}_i^{(V)})^T &= \begin{bmatrix} \Phi_i + K_i(Z_i - H_i) \\ \dots \\ G_i^{(V)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_{0_i} \\ G_{0_i} \end{bmatrix} U = \\ &= B_i + B_{0_i} U, \quad i = 1, \dots, q, \end{aligned} \quad (5)$$

где $G_{0_i} = (R_i \otimes E) \left[\frac{\partial \Phi_{0_i}}{\partial (\hat{X}, \hat{Y}_i)^T} \right]^* + (E \otimes R_i) \left[\frac{\partial \Phi_{0_i}}{\partial (\hat{X}, \hat{Y}_i)^T} \right]**$, $i = 1, \dots, q$, «*», «**» — операции с матрицами, определенные в Приложении 1; $\otimes$ — знак кронекеровского произведения; E — единичная матрица соответствующей размерности,

$$B_i = \begin{bmatrix} \Phi_i + K_i(Z_i - H_i) \\ \dots \\ G_i^{(V)} \end{bmatrix}, \quad B_{0_i} = \begin{bmatrix} \Phi_{0_i} \\ G_{0_i} \end{bmatrix}.$$

Таким образом, оценка расширенного вектора состояния ПО и его i -го ПС, наблюдаемого измерительным комплексом ПО, может быть описана векторным уравнением (5), представленным в виде, удобном для последующего решения исследуемой задачи.

Формируемая в процессе движения ПО текущая оценка навигационных параметров как ПО, так и ПС, позволяет сформулировать задачу поиска управления ПО $U(\hat{X}, \hat{Y}, t)$ как задачу синтеза управляющего вектора U , обеспечивающего минимальную апостериорную вероятность существования вектора состояния ПО X в области, ограниченной размерами сферы общего действия средств наблюдения всех ПС. В свою очередь, апостериорная вероятность P нахождения вектора X в сфере пересечения областей наблюдения всех ПС определяется известной формулой вероятности q совместных независимых событий:

$$\begin{aligned} P &= \sum_{i=1}^q P_i - \sum_{i < j} P_i P_j + (-1)^{K-1} \sum_{i_1 < \dots < i_K} P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_K} + \\ &\quad + (-1)^{q-1} P_1 \dots P_q, \end{aligned}$$

где P_i — апостериорная вероятность нахождения случайного вектора X в области наблюдения i -го ПС, векторные размеры которой известны *a priori* и неизменны на всем интервале времени движения ПО: $[D_{i\min}, D_{i\max}] = \text{const}$, а параметры движения центра описываются вектором $\hat{Y}_i$. В силу сделан-

ного выше предположения о гауссовском характере АПВ ρ_i вектора состояния X ПО:

$$\rho_i = \rho(X, \hat{X}_i, R_{iN}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \det R_{iN}}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X - \hat{X}_i)^T R_{iN}^{-1} (X - \hat{X}_i) \right\},$$

$$R_{iN} = \begin{bmatrix} R_{i11} & R_{i12} & \dots & R_{i1N} \\ R_{i21} & R_{i22} & \dots & R_{i2N} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ R_{iN1} & R_{iN2} & \dots & R_{iNN} \end{bmatrix},$$

где R_{ikj} — kj -й элемент матрицы R_p , выражение для P_i в данном случае имеет вид:

$$P_i = P_i(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, R_{iN}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \det R_{iN}}} \times \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X - \hat{X}_i)^T R_{iN}^{-1} (X - \hat{X}_i) \right\} dX =$$

$$= \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \rho(X, \hat{X}_i, R_{iN}) dX.$$

При окончательном формировании минимизируемого функционала учтем, что в силу ограниченных энергетических возможностей ПО при синтезе управления неизбежно введение ограничения на модуль вектора управления U , которое при формировании управления на текущем временном интервале может быть, например, задано в

виде условия минимума величины $\int_{t_0}^t U^T U dt$ [7, 9].

Тогда минимизируемый функционал J , отвечающий условиям поставленной проблемы, можно записать как

$$J = \sum_{i=1}^q \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \rho(X, \hat{X}_i, R_{iN}) dX -$$

$$- \sum_{i < j} \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \rho(X, \hat{X}_i, R_{iN}) dX \int_{\hat{Y}_j - D_{jmin}}^{\hat{Y}_j + D_{jmax}} \rho(X, \hat{X}_j, R_{jN}) dX +$$

$$+ (-1)^{q-1} \int_{\hat{Y}_1 - D_{1min}}^{\hat{Y}_1 + D_{1max}} \rho(X, \hat{X}_1, R_{1N}) dX \dots$$

$$\dots \int_{\hat{Y}_q - D_{qmin}}^{\hat{Y}_q + D_{qmax}} \rho(X, \hat{X}_q, R_{qN}) dX + \mu \int_{t_0}^t U^T U dt, \quad (6)$$

где $\mu = \text{const}$ — нормировочный множитель, обеспечивающий единую физическую размерность и

масштабирование всех составляющих функционала (6).

Исходя из изложенного, задачу синтеза управления ПО (1) сформулируем как задачу поиска вектора U , обеспечивающего минимум функционала J (6) при условии, что векторы параметров $\hat{X}_i$, $\hat{Y}_i$, $R_i^{(V)}$, определяющие функционал (6), описываются системой q уравнений вида (5).

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Для решения поставленной задачи воспользуемся известным фактом, что при неотрицательно определенной критериальной функции (как в рассматриваемом случае) для обеспечения ее минимального значения в каждый момент времени достаточно, чтобы производная ее по времени, взятая с обратным знаком, имела максимум [7, 9].

Для исследуемого функционала (6) предварительно имеем:

$$\dot{J} = \dot{P} + \mu U^T \dot{U} = \sum_{i=1}^q \dot{P}_i - \sum_{i < j} (\dot{P}_i P_j + P_i \dot{P}_j) +$$

$$+ (-1)^{q-1} (\dot{P}_1 P_2 \dots P_q + P_1 \dot{P}_2 \dots P_q + \dots + P_1 P_2 \dots \dot{P}_q) +$$

$$+ \mu U^T \dot{U} = \sum_{i=1}^q \dot{P}_i \left(1 - \sum_{j=1}^q P_j + \sum_{j < K} P_j P_K + \dots + (-1)^{q-1} \prod_{j \neq i}^q P_j \right) + \mu U^T \dot{U} = \sum_{i=1}^q \dot{P}_i L_i + \mu U^T \dot{U},$$

где $L_i = L_i(P_1, \dots, P_{i-1}, P_{i+1}, \dots, P_q) = L_i(\hat{X}_K, \hat{Y}_K, R_K; K = 1, \dots, q; K \neq i)$.

Раскроем далее выражение для функции $\dot{P}_i$, $i = 1, \dots, q$. Учитывая зависимость от времени вектора $\hat{Y}_i(t)$, приведенное выше явное выражение для P_i , а также что $[D_{imin}, D_{imax}] = \text{const}$, по формуле обобщенного дифференцирования по параметру (формуле Лейбница) имеем:

$$\dot{P}_i = \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \frac{d\rho(X, \hat{X}_i, R_{iN})}{dt} dX +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial(\hat{Y}_i + D_{imax})} \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \rho(X, \hat{X}_i, R_{iN}) dX \cdot \dot{\hat{Y}}_i -$$

$$- \frac{\partial}{\partial(\hat{Y}_i - D_{imin})} \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \rho(X, \hat{X}_i, R_{iN}) dX \cdot \dot{\hat{Y}}_i.$$



Обозначая далее вектор-строки как

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial(\hat{Y}_i + D_{imax})} \int_{\hat{Y}_{1_i} - D_{imin_1}}^{\hat{Y}_{1_i} + D_{imax_1}} \int_{\hat{Y}_{2_i} - D_{imin_2}}^{\hat{Y}_{2_i} + D_{imax_2}} \dots \int_{\hat{Y}_{N_i} - D_{imin_N}}^{\hat{Y}_{N_i} + D_{imax_N}} \rho(x_1, x_2, \dots, x_N, \hat{X}_i, R_{iN}) dx_1 dx_2 \dots dx_N = \\ & = \left| \begin{array}{c} \int_{\hat{Y}_{2_i} - D_{imin_2}}^{\hat{Y}_{2_i} + D_{imax_2}} \dots \int_{\hat{Y}_{N_i} - D_{imin_N}}^{\hat{Y}_{N_i} + D_{imax_N}} \rho(\hat{Y}_{1_i} + D_{imax_1}, x_2, \dots, x_N, \hat{X}_i, R_{iN}) dx_2 \dots dx_N \\ \vdots \\ \int_{\hat{Y}_{1_i} - D_{imin_1}}^{\hat{Y}_{1_i} + D_{imax_1}} \int_{\hat{Y}_{3_i} - D_{imin_3}}^{\hat{Y}_{3_i} + D_{imax_3}} \dots \int_{\hat{Y}_{N_i} - D_{imin_N}}^{\hat{Y}_{N_i} + D_{imax_N}} \rho(x_1, \hat{Y}_{2_i} + D_{imax_2}, x_3, \dots, x_N, \hat{X}_i, R_{iN}) dx_1 dx_3 \dots dx_N \\ \vdots \\ \int_{\hat{Y}_{1_i} - D_{imin_1}}^{\hat{Y}_{1_i} + D_{imax_1}} \int_{\hat{Y}_{2_i} - D_{imin_2}}^{\hat{Y}_{2_i} + D_{imax_2}} \dots \int_{\hat{Y}_{N-1_i} - D_{imin_{N-1}}}^{\hat{Y}_{N-1_i} + D_{imax_{N-1}}} \rho(x_1, x_2, \dots, x_{N-1}, \hat{Y}_{N_i} + D_{imax_N}, \hat{X}_i, R_{iN}) dx_1 dx_2 \dots dx_{N-1} \end{array} \right| = \\ & = \bar{\rho}(\hat{Y}_i + D_{imax}, \hat{X}_i, R_{iN}), \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial(\hat{Y}_i - D_{imin})} \int_{\hat{Y}_{1_i} + D_{imax_1}}^{\hat{Y}_{1_i} - D_{imin_1}} \int_{\hat{Y}_{2_i} + D_{imax_2}}^{\hat{Y}_{2_i} - D_{imin_2}} \dots \int_{\hat{Y}_{N_i} + D_{imax_N}}^{\hat{Y}_{N_i} - D_{imin_N}} \rho(x_1, x_2, \dots, x_N, \hat{X}_i, R_{iN}) dx_1 dx_2 \dots dx_N = \bar{\rho}(\hat{Y}_i - D_{imin}, \hat{X}_i, R_{iN}),$$

а также учитывая, что $\frac{d}{dt} \rho(X, \hat{X}_i, R_{iN}) = \left| \frac{\partial \rho}{\partial \hat{X}_i} : \frac{\partial \rho}{\partial R_{iN}^{(V)}} \right| \cdot \left| \begin{array}{c} \hat{X}_i \\ \dot{R}_{iN}^{(V)} \end{array} \right|$, где $R_{iN}^{(V)} = E_x R_i^{(V)}$, E_x — бинарная матрица размерности $N^2 \times 4N^2$ (структура матрицы E_x , выражения $\frac{\partial \rho}{\partial \hat{X}}$ и $\frac{\partial \rho}{\partial R_{iN}^{(V)}}$ приведены в Приложении 2), выражение для функции $\dot{P}_i$ представим далее в виде:

$$\begin{aligned} \dot{P}_i &= \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \left| \frac{\partial \rho}{\partial \hat{X}_i} : \frac{\partial \rho}{\partial R_{iN}^{(V)}} \right| dX \left| \begin{array}{c} \hat{X}_i \\ E_x \dot{R}_i^{(V)} \end{array} \right| + [\bar{\rho}(\hat{Y}_i + D_{imax}, \hat{X}_i, R_{iN}) - \bar{\rho}(\hat{Y}_i - D_{imin}, \hat{X}_i, R_{iN})] \hat{Y}_i = \left| \begin{array}{c} \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \frac{\partial \rho}{\partial \hat{X}_i} dX \\ \vdots \\ \bar{\rho}(\hat{Y}_i + D_{imax}, \hat{X}_i, R_{iN}) - \bar{\rho}(\hat{Y}_i - D_{imin}, \hat{X}_i, R_{iN}) \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{c} \hat{X}_i \\ \hat{Y}_i \\ \dot{R}_i^{(V)} \end{array} \right| = A_i \left| \begin{array}{c} \hat{X}_i \\ \hat{Y}_i \\ \dot{R}_i^{(V)} \end{array} \right|, \end{aligned}$$

где E_{2N} — единичная матрица размерности $2N$,

$$A_i = \left| \begin{array}{c} \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \frac{\partial \rho}{\partial \hat{X}_i} dX \\ \vdots \\ \bar{\rho}(\hat{Y}_i + D_{imax}, \hat{X}_i, R_{iN}) - \bar{\rho}(\hat{Y}_i - D_{imin}, \hat{X}_i, R_{iN}) \end{array} \right| \cdot \left| \begin{array}{c} \int_{\hat{Y}_i - D_{imin}}^{\hat{Y}_i + D_{imax}} \frac{\partial \rho}{\partial R_{iN}^{(V)}} dX \\ \vdots \\ \bar{\rho}(\hat{Y}_i + D_{imax}, \hat{X}_i, R_{iN}) - \bar{\rho}(\hat{Y}_i - D_{imin}, \hat{X}_i, R_{iN}) \end{array} \right| \left| \begin{array}{cc} E_{2N} & 0 \\ 0 & E_x \end{array} \right|.$$

Окончательно с учетом вида правой части уравнения (5):

$$\dot{P}_i = A_i B_i + A_i B_{0i} U.$$

Возвращаясь к приведенному выше выражению для функционала J , получаем:

$$J = \sum_{i=1}^q L_i(A_i B_i + A_i B_{0i} U) + \mu U^T U = \sum_{i=1}^q L_i A_i B_i + \left(\sum_{i=1}^q L_i A_i B_{0i} \right) U + \mu U^T U = A_* + AU + \mu U^T U,$$

$$A_* = A_*(\hat{X}, \hat{Y}, R^{(V)}) = \sum_{i=1}^q L_i A_i B_i,$$

$$A = A(\hat{X}, \hat{Y}, R^{(V)}) = \sum_{i=1}^q L_i A_i B_{0i},$$

$$\hat{X} = [\hat{X}_1^T \hat{X}_2^T \dots \hat{X}_q^T]^T, \hat{Y} = [\hat{Y}_1^T \hat{Y}_2^T \dots \hat{Y}_q^T]^T,$$

$$R^{(V)} = [R_1^{(V)T} R_2^{(V)T} \dots R_q^{(V)T}]^T,$$

откуда искомым вектор субоптимального управления U , доставляющий $\max_U(-J)$, определяется из уравнения: $-A - 2\mu U^T = 0$, т. е.

$$U_{\text{опт}} = -\frac{1}{2\mu} A^T. \quad (7)$$

Система q уравнений, определяющих динамику расширенных векторов оценивания после подстановки выражения для $U_{\text{опт}}$ (7) в формулу (5), окончательно имеет вид:

$$(\dot{\hat{X}}_i, \dot{\hat{Y}}_i, \dot{R}_i^{(V)})^T = B_i - \frac{1}{2\mu} B_{0i} A^T, \quad i = 1, \dots, q. \quad (8)$$

Таким образом, управление $U_{\text{опт}}$ (7), сформированное по показаниям измерительного комплекса ПО и решению системы уравнений оценок (8), обеспечивает принципиальное решение поставленной задачи. Для иллюстрации возможности практического применения предложенного подхода рассмотрим пример.

ПРИМЕР

Движение центра масс (ЦМ) воздушного ПО относительно Земли в географической системе координат (СК) описывается известной системой уравнений навигации [10]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\phi} \\ \dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [(R+h)\cos\phi]^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & (R+h)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = f_0(\phi, h) V, \quad (9)$$

где $\lambda_0 = \lambda(t_0)$, $\phi_0 = \phi(t_0)$, $h_0 = h(t_0)$, λ , ϕ и h — долгота,

широта и высота ЦМ; $\begin{bmatrix} [(R+h)\cos\phi]^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & (R+h)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} =$

$= f_0(\phi, h)$, R — радиус Земли; $V = [V_x \ V_y \ V_z]^T$, V_i , $i = x, y, z$ — проекции линейной скорости ЦМ на оси его сопровождающей СК (ССК) [10], формируемые далее по показаниям ИК на основании только вектора оценок навигационных параметров ПО $[\hat{\lambda}, \hat{\phi}, \hat{h}]^T$ и ПС: $V_i = V_i(\hat{\lambda}, \hat{\phi}, \hat{h}, \dots, t)$. Движение ЦМ следящих за ним двух наземных ПС задается аналогичными системами навигационных уравнений в той же (географической) СК:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{H_i} \\ \dot{\phi}_{H_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R\cos\phi_{H_i})^{-1} & 0 \\ 0 & R^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{x_i}^H \\ V_{y_i}^H \end{bmatrix} = \Phi_{0_i}(\phi_{H_i}) V_{H_i}, \quad (10)$$

$$\lambda_{H_{0i}} = \lambda_{H_i}(t_0), \quad \phi_{H_{0i}} = \phi_{H_i}(t_0), \quad i = 1, 2,$$

λ_{H_i} и ϕ_{H_i} — долгота и широта i -го наземного ПС,

$$\begin{bmatrix} (R\cos\phi_{H_i})^{-1} & 0 \\ 0 & R^{-1} \end{bmatrix} = \Phi_{0_i}(\phi_{H_i}), \quad V_{H_i} = [V_{x_i}^H \ V_{y_i}^H]^T$$

есть вектор скорости i -го ПС, формируемый на основании точной информации о движении ПО. При этом формирование вектора скорости V_{H_i} на практике осуществляется или по текущим измерениям непосредственно вектора скорости V ПО (например, с помощью радио- или оптикометрических средств ПС), или по информации от внешних средств измерения (ИСЗ, стационарных наземных измерительных пунктов и пр.) о текущих значениях долготы λ , широты ϕ и высоты h ЦМ и скорости их изменения $(\dot{\lambda}, \dot{\phi}, \dot{h})$.

В первом случае вектор скорости V ПО измеряется в ССК пункта сопровождения, что при формировании закона сопровождения требует учета взаимосвязи вектора скорости ПО V в ССК подвижного объекта с его значением V^* в ССК пункта сопровождения: $V^* = C(\Delta\lambda, \Delta\phi, 0)V$, $C(\Delta\lambda, \Delta\phi, 0)$ — матрица направляющих косинусов второго рода [10], зависящая от углов Эйлера — Крылова — углов взаимного разворота ($\Delta\lambda = \lambda - \lambda_H$; $\Delta\phi = \phi - \phi_H$; 0) ССК пункта сопровождения и ССК подвижного объекта. Закон изменения скорости V_{H_i} i -го ПС — закон сопровождения, в этом случае может быть записан как

$$V_{H_i} = \gamma_{0_i}(t) + \alpha_{0_i}(t) C(\Delta\lambda_i, \Delta\phi_i, 0)V, \quad (11)$$

где $\gamma_{0_i}(t)$ и $\alpha_{0_i}(t)$ — известные нелинейные временные векторная и матричная функции размерности, соответственно, 2 и 2×3 .



Во втором случае закон сопровождения формируется, как правило, в виде:

$$V_{H_i} = \gamma_i(t) + \alpha_i(t) \begin{vmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\phi} \\ \dot{h} \end{vmatrix} + \beta_i(t) \begin{vmatrix} \Phi_{1_i}(\Delta\lambda_i, \Delta\phi_i, t) \\ \Phi_{2_i}(\Delta\lambda_i, \Delta\phi_i, t) \end{vmatrix},$$

где $\gamma_i(t)$, $\alpha_i(t)$, $\beta_i(t)$ — известные временные векторная и матричная функции размерности соответственно 2, 2×3 и 2×2 ; Φ_{ij} , $i, j = 1, 2$ — известные нелинейные функции, зависящие от конкретного вида ПС. Так как последнее выражение может быть представлено с учетом уравнения (9) как

$$V_{H_i} = \gamma_i(t) + \alpha_i(t) f_0(\phi, h) V + \beta_i(t) \cdot \begin{vmatrix} \Phi_{1_i}(\lambda - \lambda_{H_i}, \phi - \phi_{H_i}, t) \\ \Phi_{2_i}(\lambda - \lambda_{H_i}, \phi - \phi_{H_i}, t) \end{vmatrix}, \quad (12)$$

имея при этом более общий вид по сравнению с законом (11), то при последующем решении задачи будем пользоваться именно им. Тогда, подставляя выражение (12) в выражение (10) и объединяя с уравнением (9), имеем расширенный вектор состояния ПО и i -го ПС, подлежащий дальнейшему апостериорному оцениванию:

$$(\dot{\lambda}, \dot{\phi}, \dot{h}, \dot{\lambda}_{H_i}, \dot{\phi}_{H_i})^T = \begin{vmatrix} 0 \\ \dots \\ \Phi_{0_i} \gamma_i + \Phi_{0_i} \beta_i (\Phi_{1_i}, \Phi_{2_i})^T \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} f_0 \\ \Phi_{0_i} \alpha_i f_0 \end{vmatrix} \cdot V(\hat{\lambda}, \hat{\phi}, \hat{h}, \hat{\lambda}_{H_i}, \hat{\phi}_{H_i}, t), \quad i = 1, 2,$$

или в принятых ранее обозначениях:

$$(\dot{\lambda}, \dot{\phi}, \dot{h}, \dot{\lambda}_{H_i}, \dot{\phi}_{H_i})^T = \begin{vmatrix} 0 \\ \Psi_i \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} f_0 \\ \Psi_{0_i} \end{vmatrix} \cdot U, \quad (13)$$

где $\Psi_i = \Phi_{0_i} \gamma_i + \Phi_{0_i} \beta_i (\Phi_{1_i}, \Phi_{2_i})^T$, $\Psi_{0_i} = \Phi_{0_i} \alpha_i f_0$, $U = V$. Комплексирование на борту ПО астронавигационных, оптических, радиолокационных и других ИК позволяет осуществить наблюдение не только собственных навигационных параметров ПО, но и параметров i -го ПС [11]. В общем виде такой вектор Z_i выходных сигналов ИК может быть представлен в виде [11]:

$$Z_i = H_i(\lambda, \phi, h, \lambda_{H_i}, \phi_{H_i}, t) + W_i, \quad i = 1, 2, \quad (14)$$

H_i — известная нелинейная вектор-функция размерности не меньше 5 (как правило, существенно больше); W_i — центрированный белый гауссовский вектор-шум с матрицей интенсивностей D_{W_i} . Гауссовская оценка вектора (13) по показаниям ИК (14) имеет вид:

$$(\hat{\lambda}, \hat{\phi}, \hat{h}, \hat{\lambda}_{H_i}, \hat{\phi}_{H_i})^T = \begin{vmatrix} 0 \\ \dots \\ \Psi_i(\hat{\phi}_{H_i}, \hat{\lambda}_{H_i}, \hat{\lambda}, \hat{\phi}, t) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} f_0(\hat{\phi}, \hat{h}) \\ \dots \\ \Psi_{0_i}(\hat{\phi}_{H_i}, \hat{\phi}, \hat{h}, t) \end{vmatrix} U + K_i [Z_i - H_i(\hat{\lambda}, \hat{\lambda}_{H_i}, \hat{\phi}, \hat{\phi}_{H_i}, \hat{h}, t)],$$

$$K_i = R_i \begin{vmatrix} \frac{\partial H_i}{\partial \lambda} & \frac{\partial H_i}{\partial \phi} & \frac{\partial H_i}{\partial h} & \frac{\partial H_i}{\partial \lambda_{H_i}} & \frac{\partial H_i}{\partial \phi_{H_i}} \end{vmatrix}^T D_{W_i}^{-1},$$

$$\dot{R}_i = F_i R_i + R_i F_i^T - K_i D_{W_i} K_i^T + (F_{0_i} \hat{\otimes} U) R_i + R_i (F_{0_i} \hat{\otimes} U)^T, \quad i = 1, 2,$$

$$F_i = \begin{vmatrix} 0 \\ \dots \\ \Phi_{0_i} \beta_i \begin{vmatrix} \frac{\partial \Phi_{1_i}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial \Phi_{1_i}}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \Phi_{1_i}}{\partial h} \end{vmatrix} : \Phi_{0_i} \beta_i \begin{vmatrix} \frac{\partial \Phi_{2_i}}{\partial \lambda} \\ \frac{\partial \Phi_{2_i}}{\partial \phi} \\ \frac{\partial \Phi_{2_i}}{\partial h} \end{vmatrix} : 0 : \Phi_{0_i} \beta_i \begin{vmatrix} \frac{\partial \Phi_{1_i}}{\partial \lambda_{H_i}} \\ \frac{\partial \Phi_{1_i}}{\partial \phi_{H_i}} \\ \frac{\partial \Phi_{1_i}}{\partial h} \end{vmatrix} : \frac{\partial \Phi_{0_i}}{\partial \phi_{H_i}} \left(\gamma_i + \beta_i \begin{vmatrix} \Phi_{1_i} \\ \Phi_{2_i} \end{vmatrix} \right) + \Phi_{0_i} \beta_i \begin{vmatrix} \frac{\partial \Phi_{1_i}}{\partial \phi_{H_i}} \\ \frac{\partial \Phi_{2_i}}{\partial \phi_{H_i}} \\ \frac{\partial \Phi_{2_i}}{\partial h} \end{vmatrix} \end{vmatrix}, \quad F_{0_i} = \begin{vmatrix} 0 : \frac{\partial f_0}{\partial \phi} : \frac{\partial f_0}{\partial h} : \dots : 0 \\ \vdots : \vdots : \vdots : \vdots : \vdots \\ \vdots : \vdots : \vdots : \vdots : \vdots \\ 0 : \Phi_{0_i} \alpha_i \frac{\partial f_0}{\partial \phi} : \Phi_{0_i} \alpha_i \frac{\partial f_0}{\partial h} : 0 : \frac{\partial \Phi_{0_i}}{\partial \phi_{H_i}} \alpha_i f_0 \\ \vdots : \vdots : \vdots : \vdots : \vdots \end{vmatrix},$$

Приводя матричное уравнение для R_i к векторной форме, получаем расширенный вектор оценок:

$$\begin{pmatrix} \hat{\lambda} \\ \hat{\phi} \\ \hat{h} \\ \dots \\ \hat{\lambda}_{H_i} \\ \hat{\phi}_{H_i} \\ \dots \\ \hat{R}_i^{(V)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ \Psi_i \\ \dots \\ (F_i R_i)^{(V)} + (R_i F_i^T)^{(V)} - (K_i D_{W_i} K_i^T)^{(V)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} f_0 \\ \dots \\ \Phi_{0_i} \alpha_i f_0 \\ \dots \\ (R_i \otimes E) F_{0_i}^* + (E \otimes R_i) F_i^{**} \end{pmatrix} U.$$

При формировании минимизируемого функционала J полагаем, что зона действия средств слежения обоих ПС одинакова и определяется как $[\lambda_{H_i} - 0,05; \lambda_{H_i} + 0,05]$ (рад), $[\varphi_{H_i} - 0,035; \varphi_{H_i} + 0,035]$ (рад), $h_i = 18 \times 10^3$ м, $i = 1, 2$, тогда

$$\begin{aligned} J = & \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \det R_{13}}} \int_{\lambda_{H_1}-0,05}^{\lambda_{H_1}+0,05} \int_{\varphi_{H_1}-0,035}^{\varphi_{H_1}+0,035} \int_0^{18 \cdot 10^3} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_1 \\ \hat{\phi}_1 \\ \hat{h}_1 \end{pmatrix}^T R_{13}^{-1} \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_1 \\ \hat{\phi}_1 \\ \hat{h}_1 \end{pmatrix} \right\} d\lambda d\varphi dh + \\ & + \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \det R_{23}}} \int_{\lambda_{H_2}-0,05}^{\lambda_{H_2}+0,05} \int_{\varphi_{H_2}-0,035}^{\varphi_{H_2}+0,035} \int_0^{18 \cdot 10^3} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_2 \\ \hat{\phi}_2 \\ \hat{h}_2 \end{pmatrix}^T R_{23}^{-1} \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_2 \\ \hat{\phi}_2 \\ \hat{h}_2 \end{pmatrix} \right\} d\lambda d\varphi dh - \\ & - \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \det R_{13}}} \int_{\lambda_{H_1}-0,05}^{\lambda_{H_1}+0,05} \int_{\varphi_{H_1}-0,035}^{\varphi_{H_1}+0,035} \int_0^{18 \cdot 10^3} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_1 \\ \hat{\phi}_1 \\ \hat{h}_1 \end{pmatrix}^T R_{13}^{-1} \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_1 \\ \hat{\phi}_1 \\ \hat{h}_1 \end{pmatrix} \right\} d\lambda d\varphi dh \times \\ & \times \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \det R_{23}}} \int_{\lambda_{H_2}-0,05}^{\lambda_{H_2}+0,05} \int_{\varphi_{H_2}-0,035}^{\varphi_{H_2}+0,035} \int_0^{18 \cdot 10^3} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_2 \\ \hat{\phi}_2 \\ \hat{h}_2 \end{pmatrix}^T R_{23}^{-1} \begin{pmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \hat{\lambda}_2 \\ \hat{\phi}_2 \\ \hat{h}_2 \end{pmatrix} \right\} d\lambda d\varphi dh + \mu \int_{t_0}^t U^T U dt. \end{aligned}$$

Согласно найденному выше закону управления (7), уравнения оценки (8), необходимой для его реализации, имеют вид:

$$\begin{pmatrix} \hat{\lambda} \\ \hat{\phi} \\ \hat{h} \\ \dots \\ \hat{\lambda}_{H_i} \\ \hat{\phi}_{H_i} \\ \dots \\ \hat{R}_i^{(V)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ \Psi_i \\ \dots \\ (F_i R_i)^{(V)} + (R_i F_i^T)^{(V)} - (K_i D_{W_i} K_i^T)^{(V)} \end{pmatrix} - \frac{1}{2\mu} \begin{pmatrix} f_0 \\ \dots \\ \Phi_{0_i} \alpha_i f_0 \\ \dots \\ (R_i \otimes E) F_{0_i}^* + (E \otimes R_i) F_i^{**} \end{pmatrix} \cdot A^T, \quad i = 1, 2,$$

где структура матрицы A для N -мерного случая (здесь $N = 3$) приведена выше при выводе выражения (7).

Для оценки эффективности синтезированного закона управления (7) в рассматриваемом случае было проведено численное моделирование движений ПО и ПС на временном интервале $[t_0, t_k] = [0; 1000]$ (с) при начальных значениях векторов состояния и параметрах законов движения:

$$\lambda_{H_{0_1}} = 0,8 \text{ рад}, \quad \varphi_{H_{0_1}} = 0,75 \text{ рад}, \quad \lambda_{H_{0_2}} = 0,6 \text{ рад}, \quad \varphi_{H_{0_2}} = 0,6 \text{ рад}, \quad \gamma_i = 0,$$

$$\alpha_i(t) = \begin{pmatrix} a_i \left(2 - \sqrt{\frac{t}{t_k}} \right) & 0 & 0 \\ 0 & a_i \left(4 - \sqrt{\frac{t}{t_k}} \right) & 0 \end{pmatrix}, \quad a_1 = 6,73; \quad a_2 = 6,5;$$



$$\beta_i(t) = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2,2 \end{vmatrix}, \Phi_{1_i} = \lambda - \lambda_{H_i}, \lambda_0 = 0,7 \text{ рад},$$

$$\varphi_0 = 0,68 \text{ рад}, \Phi_{2_i} = \varphi - \varphi_{H_i}, h_0 = 10 \cdot 10^3 \text{ м}, h \leq 15 \cdot 10^3 \text{ м},$$

$$H_i = \begin{vmatrix} 0,8 & & & \\ & 0,5 & 0 & \\ & & 1,2 & \\ & 0 & & 0,7 \\ & & & & 0,7 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \lambda \\ \varphi \\ h \\ \lambda_{H_i} \\ \varphi_{H_i} \end{vmatrix},$$

$$D_W = \begin{vmatrix} 4 \cdot 10^{-4} & & & \\ & 7 \cdot 10^{-4} & 0 & \\ & & 0,5 & \\ & 0 & & 8 \cdot 10^{-4} \\ & & & & 8 \cdot 10^{-4} \end{vmatrix}, i = 1, 2,$$

начальные значения вектора оценок выбирались равными их истинным значениям. В результате моделирования было установлено, что при отсутствии управления ПО наблюдается монотонное сближение значений навигационных параметров ПО и каждого из ПС: по окончании процесса движения отклонения параметров составили — по долготе $\Delta\lambda = \max(|\lambda - \lambda_{H_i}|) - 11\%$ от первоначального отклонения, по широте $\Delta\varphi = \max(|\varphi - \varphi_{H_i}|) - 16\%$. При наличии управления ПО сближения навигационных параметров не наблюдалось на всем интервале моделирования, по окончании движения отклонения параметров превысили первоначальные соответственно: $\min(\Delta\lambda_i)$ — в 2,7 раз, $\min(\Delta\varphi_i)$ — в 3,5 раза. Вычисленное с помощью метода Симпсона 4-го порядка в момент t_k значение вероятности существования вектора состояния ПО в области действия средств слежения ПС при отсутствии управления превысило при этом значение аналогичной вероятности при наличии управления ~ в 4,95 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о возможности эффективного практического применения разработанного подхода как в существующих, так и в перспективных системах управления подвижных объектов, ориентированных на преодоление подвижных пространственных областей.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Для возможности решения задач анализа матричных уравнений и использования их в процедуре синтеза оптимального управления необходимо дальнейшее расширение поля операций матричной алгебры.

С этой целью рассмотрим следующие операции и определения.

Базовая операция — правило формирования вектора $Q^{(V)}$ из элементов Q_{ij} некоторой матрицы Q размерности $m \times n$ [6]:

$$Q^{(V)} = |Q_{11} Q_{21} \dots Q_{m1} Q_{12} Q_{22} \dots Q_{m2} \dots Q_{1n} Q_{2n} \dots Q_{mn}|^T.$$

Операции над матрицами

Определение вновь введенных операций:

- операция $[Q^{(V)}]^{(\wedge)} = Q$;
- преобразование «*» блочной матрицы $B = |B_1 : B_2 : \dots : B_n|$ в блочную матрицу

$$\begin{vmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{vmatrix} \Rightarrow B^*;$$

- преобразование «**» матрицы B^T в матрицу

$$\begin{vmatrix} [(B_{(1)}^T)^{(\wedge)}]^T \\ [(B_{(2)}^T)^{(\wedge)}]^T \\ \vdots \\ [(B_{(n)}^T)^{(\wedge)}]^T \end{vmatrix} \Rightarrow B^{**},$$

где $B_{(i)}^T$ — i -й столбец B^T .

Алгебраические соотношения

- $(ASC)^{(V)} = (C^T \otimes A)S^{(V)}$, $\otimes$ — символ кронекеровского произведения, A, S, C — обыкновенные матрицы;
- $(Sh)^{(V)} = S^*h$;
- $(h^T S^T)^{(V)} = S^{**}h$;
- $S(E \otimes h^T) = S \otimes h^T$, $S(h^T \otimes E) = h^T \otimes S$, E — единичная матрица.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Структура матрицы E_x :

$$E_x = \left[\begin{array}{cc} \overbrace{E_{N0}^{(1)}}^{2N^2} & \overbrace{0}^{2N^2} \\ E_{N0}^{(2)} & 0 \\ & E_{N0}^{(3)} & 0 \\ 0 & \ddots & \\ & & E_{N0}^{(N)} \end{array} \right] \Bigg\} N^2,$$

где $E_{N0}^{(i)} = |E_N : 0_N|$, E_N — единичная матрица размерности N ; 0_N — нулевая матрица размерности N .

$$\frac{\partial p}{\partial \hat{X}} = \left[\frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \det R_N}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X - \hat{X})^T R_N^{-1} (X - \hat{X}) \right\} \times \right. \\ \left. \times (X - \hat{X})^T R_N^{-1} \right],$$

$$\frac{\partial p}{\partial R_N^{(V)}} = \left[\frac{1}{2\sqrt{(2\pi)^N \det R_N}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (X - \hat{X})^T R_N^{-1} (X - \hat{X}) \right\} \times \right. \\ \left. \times \left[(X - \hat{X})^T (R_N^{-1} E_* \hat{\otimes} R_N^{-1}) (X - \hat{X}) - \frac{1}{\det R_N} \{ R_A^{(V)} \}^T \right] \right],$$

где обозначения: $E_* = |E_1 \otimes E_N; E_2 \otimes E_N; \dots; E_m \otimes E_N|$, E_i — i -я строка матрицы E_N , E_N — единичная матрица размерности N ; $\otimes$ — символ кронекеровского произведения матриц; $\hat{\otimes}$ — символ блочного умножения матриц; R_A — матрица алгебраических дополнений матрицы R .

При выводе приведенных выражений были применены правила многомерного анализа линейных систем, полученные ранее в работах [7, 8]:

- $\frac{\partial[\det Q]}{\partial Q^{(V)}} = \{Q_A^{(V)}\}^T$, Q — некоторая произвольная неособенная матрица размерности $m \times m$;
- $\frac{\partial Q^{-1}}{\partial s} = -Q^{-1} \frac{\partial Q}{\partial s} \hat{\otimes} Q^{-1}$, s — некоторый вектор;
- $\frac{\partial Q}{\partial Q^{(V)}} = |E_1 \otimes E; E_2 \otimes E; \dots; E_m \otimes E| = E_*$, E_i — i -я строка единичной матрицы E .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алехин Д.В., Якименко О.А.* Синтез алгоритма оптимизации траектории полета по маршруту прямым вариационным методом // Изв. РАН. Теория и системы управления. — 1999. — № 4. — С. 43—51.
2. *Соколов С.В., Щербань И.В.* Локально-оптимальное управление спуском космического аппарата // Космические исследования. — 2000. — Т. 38, № 4. — С. 432—436.

3. *Маслов Е.П., Абрамянц Т.Г., Рудько И.М., Яхно В.П.* Уклонение подвижного объекта от обнаружения группой наблюдателей при малых отношениях сигнал/помеха // Информационно-управляющие системы. — 2011. — № 2. — С. 2—7.
4. *Красовский Н.Н., Субботин А.И.* Позиционные дифференциальные игры. — М.: Физматлит, 1974. — 458 с.
5. *Сысоев Л.П.* Критерий вероятности обнаружения на траектории в задаче управления движением объекта в конфликтной среде // Проблемы управления. — 2010. — № 5. — С. 73—79.
6. *Тихонов В.И., Харисов В.Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. — М.: Радио и связь, 2004. — 608 с.
7. *Соколов С.В., Ковалев С.М., Кучеренко П.А., Смирнов Ю.А.* Методы идентификации нечетких и стохастических систем. — М.: Физматлит, 2018. — 471 с.
8. *Чернов А.А., Ястребов В.Д.* Метод оценки возмущений в алгоритмах решения навигационных задач // Космические исследования. — 1984. — Т. 22, № 3. — С. 372—381.
9. *Казаков И.Е.* Статистическая теория систем управления в пространстве состояний. — М.: Наука, 1975. — 432 с.
10. *Соколов С.В., Погорелов В.А.* Стохастическая оценка, управление и идентификация в высокоточных навигационных системах. — М.: Физматлит, 2016. — 264 с.
11. *Боднер В.А.* Приборы первичной информации. — М.: Машиностроение, 1981. — 344 с.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

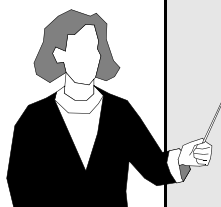
Соколов Сергей Викторович — д-р техн. наук, профессор, Ростовский государственный экономический университет, s.v.s.888@yandex.ru,

Сахарова Людмила Викторовна — д-р физ.-мат. наук, профессор, Ростовский государственный экономический университет, L_Sakharova@mail.ru,

Манин Александр Анатольевич — канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, доцент, Московский технический университет связи и информатики, manin1@rambler.ru.

Читайте в ближайших номерах

- ✓ **Алескерев Ф.Т., Тверской Д.Н.** Моделирование влияния внешней среды на возникновение специализации в абстрактных системах
- ✓ **Глуценко А.И.** Адаптивный нейросетевой настройщик ПИД-регулятора для управления нагревательными печами
- ✓ **Дорри М.Х., Рошин А.А., Середа Л.А.** Визуализация движения подводного аппарата по траектории
- ✓ **Кузнецов Д.С., Котеленко С.А., Пятецкий В.Е.** Идентификация операционной модели управления производственным комплексом
- ✓ **Мелехин В.Б., Хачумов В.М.** Многоуровневая модель ситуационного управления сложными технологическими процессами
- ✓ **Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В.** Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 2. Нестандартные подходы к проблеме
- ✓ **Суховеров В.С.** Система автоматической обработки тематически ориентированных текстов с терминологическим словарем в формате регулярных выражений
- ✓ **Трошин Д.В.** Методический подход к моделированию рационального сценария обеспечения экономической безопасности России в долгосрочной перспективе
- ✓ **Угольницкий Г.А.** Методология и прикладные задачи управления устойчивым развитием активных систем
- ✓ **Шевыренков М.Ю.** Оценка влияния активных прогнозов на рынки энергоносителей на примере европейского рынка газа



ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВЫВЕДЕНИЯ РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ «СОЮЗ-2» ПУТЕМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ТОПЛИВА НА МНОГОБЛОЧНОЙ I СТУПЕНИ

А.И. Чадаев, Е.И. Тропова

Рассмотрены возможные алгоритмы прогнозирования выработки топлива боковых блоков применительно к работе многоблочной I ступени ракеты-носителя «Союз-2». Приведены результаты сравнительного анализа точностных характеристик работы рассмотренных алгоритмов прогнозирования для некоторых нештатных ситуаций.

Ключевые слова: ракета-носитель, система прогнозирования выработки топлива, алгоритм управления, нештатная ситуация.

ВВЕДЕНИЕ

Прогнозирование выработки топлива в процессе полета ракеты-носителя (РН) осуществляется как с целью повышения энергетики РН, так и обеспечения безопасности ее выведения [1, 2]. Обеспечение безопасности полета РН с помощью системы прогнозирования выработки топлива (СПВ) имеет две составляющие. Первая из них — предотвращение риска возникновения пожара при работе двигательной установки в условиях прекращения поступления одного из компонентов топлива. Вторая — обеспечение падения отработавшей ступени в заданные районы при нештатном прерывании работы ее двигателей.

Решение этих двух задач в условиях работы I ступени РН «Союз-2» порождает определенные сомнения в целесообразности применения СПВ.

Прежде всего, на двигателях боковых блоков (ББ) предусмотрен процесс самовыключения при выработке какого-либо компонента топлива.

Далее, близость траектории полета I ступени к траектории «стрельбы на предельную дальность» делает практически невозможным приведение (посредством управления углом тангажа РН на активном участке полета) точки падения I ступени в неизменный район при преждевременном выключении двигателей.

И тем не менее, прогнозирование момента времени выключения двигателей (в момент выработки одного из компонентов топлива) может оказаться весьма полезным при наличии на трассе полета I ступени запретных (например, густонаселенных) зон падения отработавших блоков РН.

ВАРИАНТЫ АЛГОРИТМОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВЫРАБОТКИ ТОПЛИВА

Применительно к задаче обеспечения безопасности выведения РН рассматривались три алгоритма действия СПВ I ступени:

— алгоритм 1, прогнозирующий момент времени T выработки суммарного топлива многоблочной I ступени;

— алгоритм 2, прогнозирующий моменты времени T_l , $l = 1, 2, \dots, 4$, выработки топлива каждого l -го ББ I ступени;

— алгоритм 3, осуществляющий прогнозирование моментов времени T_l^O и T_l^F , $l = 1, 2, \dots, 4$, опорожнения баков окислителя и горючего каждого из ББ.

В основе всех трех алгоритмов лежит унифицированная процедура обработки входных сигналов t_{il}^O , t_{il}^F , $l = 1, 2, \dots, 4$, — моментов времени срабатывания i -х, $i = 1, 2, \dots, 32$, чувствительных элементов (ч. э.) уровнемеров окислителя и горючего l -го бокового блока I ступени:

$$X_i = x_i + T_i(1 + \lambda_i), \quad i = 1, 2, \dots, 32;$$

$$\lambda_i = \lambda_{i-1} + \Delta\lambda_i, \quad \lambda_0 = 0;$$

$$\Delta\lambda_i = \begin{cases} 0, & i = 1, \\ C(D_i\Delta\tau_i - \Delta\tau_{i-1}), & i > 1, \end{cases}$$

$$\Delta\tau_i = \tau_i - x_i;$$

$$x_i = \begin{cases} t_1, & i = 1, \\ x_{i-1} + (T_{i-1} - T_i)(1 + \lambda_{i-1}), & i > 1, \end{cases}$$

где C, D_i — выбираемые для каждого варианта алгоритма действия СПВ параметры, обеспечивающие исполнение заданных требований к точности прогнозирования; t_1 — номинальный момент времени срабатывания первого ч. э. уровнемеров компонентов топлива ББ; T_i — номинальный интервал времени от момента срабатывания i -го ч. э. уровнемеров компонентов топлива ББ до момента полной выработки топлива.

При реализации алгоритма 1:

$X_i = T_i^{\text{пр}}$ — прогнозируемое в i -й дискретный момент времени значение T ,

$$\tau_i = \frac{1}{4(K_m + 1)} \sum_{l=1}^4 (K_m t_{il}^O + t_{il}^{\Gamma});$$

при реализации алгоритма 2:

$X_i = T_{il}^{\text{пр}}$ — прогнозируемое в i -й дискретный момент времени значение $T_p, l = 1, 2, \dots, 4$,

$$\tau_i = \frac{1}{K_m + 1} (K_m t_{il}^O + t_{il}^{\Gamma});$$

при реализации алгоритма 3:

$X_i = T_{il}^{\text{Опр}}$ (либо $T_{il}^{\Gamma\text{пр}}$) — прогнозируемое в i -й момент времени значение T_l^O (либо T_l^{Γ}),

$l = 1, 2, \dots, 4$,

$$\tau_i = t_{il}^O \text{ (либо } t_{il}^{\Gamma}).$$

Здесь K_m — номинальное соотношение массовых расходов компонентов топлива ББ; промежуточные переменные $x_p, \lambda_p, \Delta\lambda_p, \Delta\tau_i$ определяются рекуррентным образом при поступлении входных сигналов $t_{il}^O, t_{il}^{\Gamma}$.

Для определенности на многоблочной I ступени принимаем, что при выработке одного из компонентов топлива первого (по времени) двигателя система управления РН практически сразу выключает и остальные двигатели ступени, и тогда в качестве выходной координаты СПВ можно принять прогнозируемый момент $T_i^{\text{пр}}$ времени выключения двигателей I ступени, формируемый по правилу

$$T_i^{\text{пр}} = \begin{cases} T_{32}^{\text{пр}} & \text{— в алгоритме 1,} \\ \min_l \{ T_{32l}^{\text{пр}}, l = 1, 2, \dots, 4 \} & \text{— в алгоритме 2,} \\ \min_l \{ \min(T_{il}^{\text{Опр}}, T_{il}^{\Gamma\text{пр}}), l = 1, 2, \dots, 4 \} & \text{— в алгоритме 3.} \end{cases}$$

Вероятностное оценивание точностных характеристик СПВ проводилось посредством статис-

тического моделирования работы СПВ совместно с системами внутриблочного регулирования опорожнения баков (СОБ) боковых блоков, системой управления межблочной синхронизацией опорожнения баков и системой регулирования кажущейся скорости (РКС) РН «Союз-2».

Моделирование выполнялось применительно к штатной ситуации выведения РН и к трем типам нештатных ситуаций, связанных с преждевременным, сравнительно с штатным выключением, прекращением работы двигателей I ступени:

- ситуации 1, не приводящей к меж- и внутриблочной рассинхронизации опорожнения баков;
- ситуации 2, приводящей к межблочной рассинхронизации опорожнения баков;
- ситуации 3, приводящей к внутриблочной рассинхронизации опорожнения баков.

Конкретно, ситуация 1 имитировалась повреждениями в системе РКС с выдачей ложного сигнала на дросселирование двигателей I ступени, ситуация 2 — выходом из строя (обрывом цепи питания) привода винта газового редуктора в одном из ББ, ситуация 3 — выходом из строя дросселя СОБ одного из ББ. Результаты моделирования представлены в таблице.

Как следует из первого числового столбца этой таблицы, по точности прогнозирования в штатной ситуации выведения (и в нештатной 1) алгоритмы 1—3 весьма слабо различаются между собой, и если бы рассматривался вопрос о реализации полной выработки топлива I ступени для повышения штатной грузоподъемности РН, предпочтение следовало бы отдать алгоритму 2 — прогнозированию выработки топлива каждого из боковых блоков. Но применительно к задаче обеспечения безопасности выведения алгоритм 1 оказывается практически неработоспособным в нештатных ситуациях 2 и 3, а алгоритм 2 — в нештатной ситуации 3 (см. две первые числовые строки таблицы). Зато фактически инвариантным (по точности прогнозирования) к нештатности ситуаций выведения оказывается алгоритм 3 (см. последнюю стро-

Результаты моделирования

Вариант алгоритма СВР I ступени	Статистически предельная погрешность прогнозирования момента времени выключения двигателей I ступени при выработке одного из компонентов топлива в ситуациях выведения РН		
	штатной и нештатной 1, с	нштатной 2, с	нштатной 3, с
Алгоритм 1	0,25	3,92	5,07
Алгоритм 2	0,23	0,22	5,06
Алгоритм 3	0,24	0,24	0,24



ку таблицы), реализующий прогнозирование моментов выработки компонентов топлива каждого из баков ББ с последующим выделением наименьшего из этих восьми моментов. Отметим, что приведенные в последней строке таблицы значения статистически предельной погрешности прогнозирования полностью соответствуют точностным требованиям, предъявляемым к работе системы СПВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в нештатной ситуации при формировании в системе управления I ступени ракеты-носителя «Союз-2» команды на выключение двигателей, позволяющей избежать падения отработавших боковых блоков в запретные зоны, необходимо применять алгоритм 3 уровнемерного прогнозирования (с погрешностью 0,24 с) момента времени выключения двигателей I ступени по выработке одного из компонентов топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андриенко А.Я., Портнов-Соколов Ю.П., Чадаев А.И. Критерии выбора облика перспективных средств гарантированного выведения на орбиту // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем. Процессы, модели, эксперимент. Российско-американский научный журнал. — 2003. — Т. 8, вып. 1 (15). — С. 1—8.
2. Чадаев А.И., Тропова Е.И. Прогнозирование выработки топлива — способ повышения безопасности выведения РН // Материалы 35-й Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий, посвященной 70-летию Победы. Миасс, 2015. — М., 2015. — Т. 4. — С. 30—35.

Сообщение представлено к публикации членом редколлегии Б.В. Павловым.

Чадаев Александр Иванович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник,

Тропова Елена Ивановна — науч. сотрудник,

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ vladguc@ipu.ru.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2018 г.

Афанасьев В.Н., Матвеева Н.А. Построение управления для нелинейной системы с квазипостоянными параметрами регулятора. — № 1. — С. 37—46.

Бабаев Д.И., Полетыкин А.Г., Промыслов В.Г., Тимофеев М.Ю. Управление архитектурой кибербезопасности АСУТП атомных электростанций. — № 3. — С. 47—55.

Бабушкина Н.А., Кузина Е.А., Лоос А.А., Беляева Е.В. Результаты исследования режимов применения противоопухолевых вирусных вакцин на основе математического моделирования. — № 4. — С. 61—70.

Бауэр В.П., Зацаринный А.А., Ильин Н.И. и др. Прорывное ситуационное управление. — № 5. — С. 31—38.

Белов М.В., Новиков Д.А. Основы теории комплексной деятельности. Ч. 1. Структуры комплексной деятельности. Неопределенность и порождение комплексной деятельности. — № 4. — С. 36—45.

Белов М.В., Новиков Д.А. Основы теории комплексной деятельности. Ч. 2. Жизненные циклы комплексной деятельности. Организация и управление как комплексная деятельность. — № 5. — С. 39—48.

Белов М.В., Новиков Д.А. Сетевые активные системы: модели планирования и стимулирования. — № 1. — С. 47—57.

Блюмин С.Л., Боровкова Г.С. Применение анализа конечных изменений и метода обратных вычислений в системах управления и поддержки принятия решений. — № 6. — С. 29—34.

Богомолов А.С., Иващенко В.А., Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д., Цесарский Л.Г., Филимонок Л.Ю. Моделирующий комплекс для анализа критических сочетаний событий в авиационных транспортных системах. — № 1. — С. 74—79.

Васильев Г.А., Казаков В.Г., Тараканов А.Ф. Теоретико-игровое моделирование противостояния сторон на основе рефлексивного управления. — № 5. — С. 49—55.

Ведешников В.А. Метод построения контролирующего теста для цифровых систем со структурой минимального квазиполного графа (на примере графа размера 11×11). — № 3. — С. 33—39.

Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 1. Методы точного решения. — № 4. — С. 2—13.

Вересников Г.С., Егоров Н.А., Кулида Е.Л., Лебедев В.Г. Методы построения оптимальных очередей воздушных судов на посадку. Ч. 2. Методы приближенного решения. — № 5. — С. 2—13.

Галаяев А.А., Лысенко П.В. Задача оптимального быстрого действия при упругом и вязкоупругом взаимодействиях тела с поверхностью. — № 4. — С. 14—20.

Гранин С.С., Мандель А.С. Оптимизация процесса управления запасами в цепи поставок при наличии альтернативных поставщиков. — № 6. — С. 24—28.

Грибанова Е.Б. Алгоритмы моделирования распространения информации при маркетинговых мероприятиях в группах онлайн-социальной сети. — № 1. — С. 66—73.

Гусев В.Б. Модели автономного управления в развивающихся системах. — № 6. — С. 2—17.

XXV международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем». — № 2. — С. 75—79.

Деменков Н.П., Микрин Е.А., Мочалов И.А. Нечеткие двухточечные краевые задачи в математическом моделировании и управлении. Ч. 1. Нечеткое математическое моделирование. — № 1. — С. 30—36.

Деменков Н.П., Микрин Е.А., Мочалов И.А. Нечеткие двухточечные краевые задачи в математическом моделировании и управлении. Ч. 2. Нечеткое управление. — № 2. — С. 31–39.

Десятая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2017. — № 3. — С. 76–80.

Дорофеук Александр Александрович. — № 3. — С. 81.

Жиликова Л.Ю., Кузнецов Н.А., Матюхин В.Г. и др. Графовая модель распределения локомотивов для грузовых перевозок на линейном участке железной дороги. Задача о максимальном по включению покрытии графика. — № 3. — С. 65–75.

Завадский В.К., Иванов В.П., Каблова Е.Б., Кленовая Л.Г. Комплексирование расходомерной и уровнемерной информации в системах управления расходом топлива. — № 4. — С. 71–77.

Иванов Н.Н. Обобщенные стохастические сетевые графики с нестандартными дисциплинами свершения событий. — № 5. — С. 26–30.

Квинто Я.И., Хлебников М.В. Верхние оценки больших отклонений в линейных системах при наличии неопределенности. — № 4. — С. 2–7.

Ключков В.В., Рождественская С.М. Молодежные гранты как средство управления развитием науки: анализ эффективности. — № 3. — С. 8–16.

Майер Р.В. Информационно-кибернетический подход к исследованию дидактических систем. — № 5. — С. 66–72.

Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Павлова Е.А. Управление плазмой в токамаках. Ч. 2. Системы магнитного управления плазмой. — № 2. — С. 2–30.

Митришкин Ю.В., Коренев П.С., Прохоров А.А., Карцев Н.М., Патров М.И. Управление плазмой в токамаках. Ч. 1. Проблема управляемого термоядерного синтеза. Токамаки. Компоненты систем управления. — № 1. — С. 2–20.

Муранов А.А. Анализ работы бортовых терминальных систем моноблочных жидкостных ракет-носителей при нештатном расходовании компонентов топлива. — № 5. — С. 73–78.

Подлазов В.С. Бесконфликтная самомаршрутизация для трехмерного обобщенного гиперкуба. — № 3. — С. 26–32.

Подлазов В.С. Бесконфликтная самомаршрутизация для трехмерного полного мультикольца. — № 4. — С. 54–60.

Постнов С.С. Задачи оптимального управления для некоторых линейных систем дробного порядка, заданных уравнениями с производной Хильфера. — № 5. — С. 14–25.

Постнова Е.А. Оптимальное управление движением системы, моделируемой двойным интегратором дробного порядка. — № 2. — С. 40–46.

Пшихов В.Х., Медведев М.Ю. Многоконтурное адаптивное управление подвижными объектами при решении траекторных задач. — № 6. — С. 62–72.

Рапопорт Л.Б. Применение метода полуопределенной релаксации для определения ориентации твердого тела в пространстве. — № 5. — С. 79–83.

Резчиков А.Ф., Твердохлебов В.А. Метод рекуррентного и Z-рекуррентного управления функционированием сложной системы. — № 3. — С. 56–64.

Русев В.Н., Скориков А.В. Аппроксимации функции восстановления и стратегия управления эксплуатационными затратами. — № 4. — С. 28–35.

Сидельников Ю.В., Ряпухин А.В. Повышение эффективности совещаний в малых группах. Ч. 1. Традиционные подходы к проблеме. — № 6. — С. 18–23.

Силич М.П., Силич В.А., Аксенов С.В. Способы оценки факторов гибридной иерархической когнитивной карты на примере оценки состояния сферы теплоснабжения регионов. — № 2. — С. 58–65.

Сиротюк В.О. Формализованные модели и методы анализа и оценки полноты патентных информационных фондов (на примере международной патентной организации). — № 6. — С. 35–43.

Соколов С.В., Сахарова Л.В., Манин А.А. Стохастическое управление маневром обхода группы подвижных пространственных областей. — № 6. — С. 73–82.

Сомов С.К. Задача оптимального размещения информационно-технологического резерва в распределенных системах обработки данных. — № 4. — С. 46–53.

Сомов С.К. Создание информационно-технологического резерва в распределенных системах обработки данных. — № 3. — С. 40–46.

Стецюра Г.Г. Сетевая информационно-вычислительная поддержка взаимодействия подвижных роботов. — № 5. — С. 56–65.

Цирлин А.М., Овсепян В.С. Робастная устойчивость и выбор настройки регуляторов для технологических объектов с запаздыванием. — № 4. — С. 21–27.

Цодиков Ю.М. Эффективность метода последовательного линейного программирования для задач планирования производства на нефтеперерабатывающем заводе. — № 6. — С. 55–61.

Цыганов В.В. Правильные адаптивные механизмы с идентификацией. — № 2. — С. 47–57.

Чадаев А.И., Тропова Е.И. Повышение безопасности выведения ракеты-носителя «Союз-2» путем прогнозирования выработки топлива на многоблочной I ступени. — № 6. — С. 83–85.

Шалагинова З.И. Разработка методов количественного обоснования мест расстановки промежуточных узлов управления в крупных системах теплоснабжения. — № 6. — С. 44–54.

Шведов А.С. Аппроксимация функций с помощью нейронных сетей и нечетких систем. — № 1. — С. 21–29.

Шевченко А.М., Начинкина Г.Н., Городнова М.В. Методика разработки эффективных алгоритмов прогнозирования режима торможения самолета. — № 2. — С. 66–74.

Шишов Б.А. Оценка когнитивной загруженности оператора на основе видеоинформации с помощью рекуррентных нейронных сетей. — № 2. — С. 58–65.

Щепкин А.В. Противозатратные механизмы финансирования. — № 3. — С. 17–25.

INDEX OF PAPERS PUBLISHED IN 2018

Afanas'ev V.N., Matveeva N.A. Construction of control for nonlinear system with quasi-constant regulator parameters. — N 1. — P. 37–46.

Aleksander Aleksandrovich Dorofeyuk. — N 3. — P. 81.

Babaev D.I., Poletikin A.G., Promyslov V.G., Timofeev M.Yu. Managing the cybersecurity architecture of automated process control systems of nuclear power plants. — N 3. — P. 47–55.

Babushkina N.A., Kuzina E.A., Loos A.A., Belyaeva E.V. Results of the antitumor viral vaccine introduction regimens study based on mathematical modeling. — N 4. — P. 61–70.

Bauer V.P., Zatsarinny A.A., Ilyin N.I., et al. Disruptive situational control. — N 5. — P. 31–38.

Belov M.V., Novikov D.A. Foundations of the complex activity theory. Part 1. The structures of complex activity. Uncertainty and generation of complex activity. — N 4. — P. 36–45.



- Belov M.V., Novikov D.A.** Foundations of the complex activity theory. Part 2. Life cycles of complex activity. Organization and management as a complex activity. — N 5. — P. 39–48.
- Belov M.V., Novikov D.A.** Network active systems: planning and stimulation models. — N 1. — P. 47–57.
- Blyumin S.L., Borovkova G.S.** Application of analysis of finite fluctuations and reverse computations in control systems and decision support systems. — N 6. — P. 29–34.
- Bogomolov A.S., Ivashchenko V.A., Kushnikov V.A., et al.** Modeling complex for critical events combinations analysis in aviation transport systems. — N 1. — P. 74–79.
- Chadaev A.I., Tropova E.I.** Increase in safety injectoin of the carrier rocket «Souz-2» by forecasting of fuel use at the multiblok i rocket stage. — N 6. — P. 83–85.
- Demenkov N.P., Mikrin E.A., Mochalov I.A.** Fuzzy two-point boundary value problems in mathematical modeling and control. Part 1. Fuzzy mathematical modeling. — N 1. — P. 30–36.
- Demenkov N.P., Mikrin E.A., Mochalov I.A.** Fuzzy two-point boundary value problems in mathematical modeling and control. Part 2. Fuzzy control. — N 2. — P. 31–39.
- Galyaev A.A., Lysenko P.V.** Minimum-time control problem for elastic and visco-elastic interaction between body and surface. — N 4. — P. 14–20.
- Granin S.S., Mandel A.S.** Optimization of inventory management process in a supply chain having alternative suppliers. — N 6. — P. 24–28.
- Gribanova E.B.** Algorithms of information diffusion modeling in marketing activities within the groups of online social network. — N 1. — P. 66–73.
- Gusev V.B.** Models of autonomous control in the developing systems. — N 6. — P. 2–17.
- Ivanov N.N.** Generalized stochastic networks with non-standard events execution disciplines. — N 5. — P. 26–30.
- Klochkov V.V., Rozhdestvenskaya S.M.** Youth grants as a management tool for science development: effectiveness analysis. — N 3. — P. 8–16.
- Kvinto Ya.I., Khlebnikov M.V.** Upper estimates of large deviations in linear systems in presence of uncertainty. — N 3. — P. 2–7.
- Mayer R.V.** Information-cybernetic approach to the study of didactic systems. — N 5. — P. 66–72.
- Mitrishkin Yu.V., Kartsev N.M., Pavlova E.A., et al.** Plasma control in tokamaks. Part 2. Magnetic plasma control systems. — N 2. — P. 2–30.
- Mitrishkin Yu.V., Korenev P.S., Prokhorov A.A., et al.** Plasma control in tokamaks. Part 1. Controlled thermonuclear fusion problem. Tokamaks. control systems components. — N 1. — P. 2–20.
- Muranov A.A.** The analysis of work of onboard terminal systems in monoblock liquid launch vehicles at the abnormal expenditure of fuel components. — N 5. — P. 73–78.
- Podlazov V.S.** Conflict-free self-routing for a three-dimensional complete multiring. — N 4. — P. 54–60.
- Podlazov V.S.** Conflict-free self-routing for three-dimensional generalized hypercube. — N 3. — P. 26–32.
- Postnov S.S.** Optimal control problems for certain linear fractional-order systems given by equations with hilfer derivative. — N 5. — P. 14–25.
- Postnova E.A.** Optimal motion control of the system modeled by double integrator of fractional order. — N 2. — P. 40–46.
- Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.** Multi-loop adaptive control of mobile objects in solving trajectory tracking tasks. — N 6. — P. 62–72.
- Rapopot L.B.** Application of the semi-definite relaxation method to the attitude determination of the rigid body. — N 5. — P. 79–83.
- Rezhnikov A.F., Tverdokhlebov V.A.** Method of recurrent and z -recurrent control of complex system functioning. — N 3. — P. 56–64.
- Rusev V.N., Skorikov A.V.** Approximations of the renewal function and operating costs management strategy. — N 4. — P. 28–35.
- Shalaginova Z.I.** Development of methods of quantitative substantiation of intermediate control units arrangement places in large heat supply systems. — N 6. — P. 44–54.
- Shchepkin A.V.** Cost-reducing funding mechanisms. — N 3. — P. 17–25.
- Shevchenko A.M., Nachinkina G.N., Gorodnova M.V.** Efficient algorithms development for predicting the braking mode of the aircraft. — N 2. — P. 66–74.
- Shishov B.A.** Cognitive load estimation on the basis of video information using recurrent neural networks. — N 2. — P. 58–65.
- Shvedov A.S.** Functions approximating by neural networks and fuzzy systems. — N 1. — P. 21–29.
- Sidelnikov Yu.V., Ryapukhin A.V.** Improving the effectiveness of meetings in small groups. Part 1. Traditional approaches to the problem. — N 6. — P. 18–23.
- Silich M.P., Silich V.A., Axyonov S.V.** Methods of hierarchical hybrid cognitive map factors estimation on the example of assessment of energy consumption in regions. — N 1. — P. 58–65.
- Sirotuk V.O.** Formalized models and methods for analyzing and assessing the completeness of patent information funds (using the example of an international patent organization). — N 6. — P. 35–43.
- Sokolov S.V., Sakharova L.V., Manin A.A.** Stochastic control of the maneuver to bypass the group of the moving spatial domains. — N 6. — P. 73–82.
- Somov S.K.** Creation of information-technological reserve in distributed data processing systems. — N 3. — P. 40–46.
- Somov S.K.** The problem of the optimal placing of the information-technological backup in distributed data processing systems. — N 4. — P. 46–53.
- Stetsyura G.G.** Network information-computing support of automatic mobile objects interaction. — N 5. — P. 56–65.
- THE 10th International conference «Management of large-scale system development MLSD?2017».** — N 3. — P. 76–80.
- Tsirlin A.M., Hovsepyan V.S.** Robust stability and selection of regulators settings for technological objects with delay. — N 4. — P. 21–27.
- Tsodikov Yu.M.** Successive linear programming method efficiency in solving the problems of production planning at oil refinery. — N 6. — P. 55–61.
- Tsyganov V.V.** The correct adaptive mechanisms with identification. — N 2. — P. 47–57.
- Vasiliev G.A., Kazakov V.G., Tarakanov A.F.** Game-theoretical modeling of confrontation between the parties based on the reflexive control. — N 5. — P. 49–55.
- Vedeshnikov V.A.** Method of controlling test construction for digital systems with minimal quasicomplete graph structure (on example of graph by dimension 11×11). — N 3. — P. 33–39.
- Veresnikov G.S., Egorov N.A., Kulida E.L., Lebedev V.G.** Methods for solving of the aircraft landing problem. Part 1. Exact solution methods. — N 4. — P. 2–13.
- Veresnikov G.S., Egorov N.A., Kulida E.L., Lebedev V.G.** Methods for solving of the aircraft landing problem. Part 2. Approximate solution methods. — N 5. — P. 2–13.
- XXV International conference «The problems of complex systems security management».** — N 2. — P. 75–79.
- Zavadsky V.K., Ivanov V.P., Kablova E.B., Klenovaya L.G.** Integration of the flow and level measurement information for propellant consumption control systems. — N 4. — P. 71–77.
- Zhilyakova L.Yu., Kuznetsov N.A., Matiukhin V.G., et al.** Locomotive assignment graph model for freight traffic on linear section of railway. The problem of finding a maximal independent schedule coverage. — N 3. — P. 65–75.

CONTENTS & ABSTRACTS

MODELS OF AUTONOMOUS CONTROL IN THE DEVELOPING SYSTEMS 2

Gusev V.B.

The survey of the problem of development and application of autonomous control models in the developing systems is presented. The formalized description of the class of the developing systems autonomous control models with reproduction is proposed. The combination concept of the mechanisms of indicative planning and regulation under the conditions of technological and information constraints is briefly described. Problematic issues are formulated, and recommendations for constructing the autonomous control systems under the conditions of instability and external disturbances, based on the examples of indicative planning and of regional development management are given.

Keywords: models, developing system, autonomous control, indicative planning, regulation, technological and information limitations.

IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF MEETINGS IN SMALL GROUPS. PART 1. TRADITIONAL APPROACHES TO THE PROBLEM18

Sidelnikov Yu.V., Ryabukhin A.V.

The basic concepts and basic hypotheses of research in the field of improving the efficiency of meetings in small groups are considered. The review is given of the decision-making models in enterprises and organizations, of the main types of meetings held by a small group of specialists, of the main approaches to the problem of improving the efficiency of meetings.

Keywords: meeting, efficiency of the meeting, identification, meeting procedure.

OPTIMIZATION OF INVENTORY MANAGEMENT PROCESS IN A SUPPLY CHAIN HAVING ALTERNATIVE SUPPLIERS24

Granin S.S., Mandel A.S.

An inventory management problem is considered, related to the optimization of the processes emerging in a supply chain in presence of several alternative suppliers with different reliability and econometrical characteristics. Two cases are investigated: (a) the delivery costs share is fixed and the same for all the suppliers while the costs per unit of goods are different, and (b) all cost components are different for different suppliers. Algorithms of constructing the optimal strategies of the inventory management and of the suppliers selection are proposed for case (a). For case (b), the general plan is built of forming the optimal strategies. The results of the numerical modelling are given.

Keywords: inventory management, supply chains, alternative suppliers, dynamic programming.

APPLICATION OF ANALYSIS OF FINITE FLUCTUATIONS AND REVERSE COMPUTATIONS IN CONTROL SYSTEMS AND DECISION SUPPORT SYSTEMS29

Blumin S.L., Borovkova G.S.

The method of organizational systems control is suggested, focused on increasing the efficiency of socio-economic indicators, wherein the method of reverse computations is used as a means of finding the factors values to achieve the desired indicator value, and which anticipates the analysis of finite fluctuations as a method of assessing the impact found. The work of the new method is illustrated, the analysis and the comparison are conducted of the two theorems of the analysis of finite fluctuations, that are applicable within the framework of the method developed.

Keywords: analysis of finite fluctuations, Lagrange's theorem, second mean-value theorem, method of reverse calculations.

FORMALIZED MODELS AND METHODS FOR ANALYZING AND ASSESSING THE COMPLETENESS OF PATENT INFORMATION FUNDS (USING THE EXAMPLE OF AN INTERNATIONAL PATENT ORGANIZATION) ...35

Sirotyuk V.O.

The requirements to the structure and completeness of the patent information fund are formulated. The definition of the completeness indicator of the fund is given, and formalized models and methods for its analysis and evaluation are proposed. The results obtained were used in assessing the completeness and improving of databases of the patent information fund of the international patented organization — the Eurasian Patent Office.

Keywords: patent information fund, patent search of an international type, database of patent and non-patent information, thematic database, indicator of completeness of the patent information fund, a master database of patent and non-patent information.

DEVELOPMENT OF METHODS OF QUANTITATIVE SUBSTANTIATION OF INTERMEDIATE CONTROL UNITS ARRANGEMENT PLACES IN LARGE HEAT SUPPLY SYSTEMS44

Shalaginova Z.I.

The mathematical model is given of a heat-supply system (HSS) thermal-hydraulic operation modes over time, taking into account the transport delay, as well as disturbing and control actions. Indices of provision sufficiency for customers have been developed, integrated with respect to calculation time period based on the simulation modeling of thermal-hydraulic operation modes. An approach to the problem of arranging intermediate stages of regulation is proposed, based on constructing the matrices of paths starting at the end-user's points and directed opposite to the heat carrier flow.

Keywords: heat supply system, multi-level modeling, intermediate control stage, regime controllability index, synthesis, methodology, algorithm, calculation, information computational complex.

SUCCESSIVE LINEAR PROGRAMMING METHOD EFFICIENCY IN SOLVING THE PROBLEMS OF PRODUCTION PLANNING AT OIL REFINERY55

Tsodikov Yu.M.

The problem of the optimal planning of oil refineries production is formulated in the form that provides for solving it using the successive linear programming (SLP) method. The factors affecting the convergence of this method while solving nonlinear problems of large dimensionality are considered. The example of a nonlinear model is given. The influence of the accuracy of the solution is investigated, and recommendations are given for improving the convergence for complex models.

Keywords: optimal planning, successive linear programming, nonlinear programming, multi-period planning.

MULTI-LOOP ADAPTIVE CONTROL OF MOBILE OBJECTS IN SOLVING TRAJECTORY TRACKING TASKS62

Pshikhov V.Kh., Medvedev M.Yu.

The algorithms of model reference parametric adaptation are considered, providing the astaticism and disturbances estimation. The structure of the control system is suggested allowing to design multivariable controllers providing the movement along the specified trajectories for an object described by kinematics and dynamics of mechanical systems in three-dimensional space. The asymptotic stability of a closed-loop adaptive system including a loop to provide astaticism is proved by the method of Lyapunov functions. The errors analysis is carried out of disturbances estimation by asymptotic observer. The boundaries of the estimation error are shown, and the relations are given to adjust the observer parameters. The results of the numerical investigations are given.

Keywords: adaptive control, reference model, path control, astaticism, asymptotic estimator, multi-loop adaptation, parametric adaptation.

STOCHASTIC CONTROL OF THE MANEUVER TO BYPASS THE GROUP OF THE MOVING SPATIAL DOMAINS ... 73

Sokolov S.V., Sakharova L.V., Manin A.A.

The problem is solved of the stochastic control of the moving object maneuvering to minimize the probability for it to get into a coverage area of measuring devices of a group of mobile tracking units, keeping the track of it. The moving object control is realized based on a posteriori estimates of both the vector of its own state as well as the vectors of the state of the group of mobile tracking units, obtained from the readings of the measuring instruments located directly on an object board. An example is given illustrating the effectiveness of the approach proposed.

Keywords: mobile object, group of mobile tracking units, a posteriori estimation, stochastic control, probability of existence of the state vector.

IMPROVING THE LAUNCH SAFETY OF THE LAUNCH VEHICLE «SOYUZ-2» BY FORECASTING THE FUEL USE IN THE MULTI-BLOCK FIRST STAGE83

Chadaev A.I., Tropova E.I.

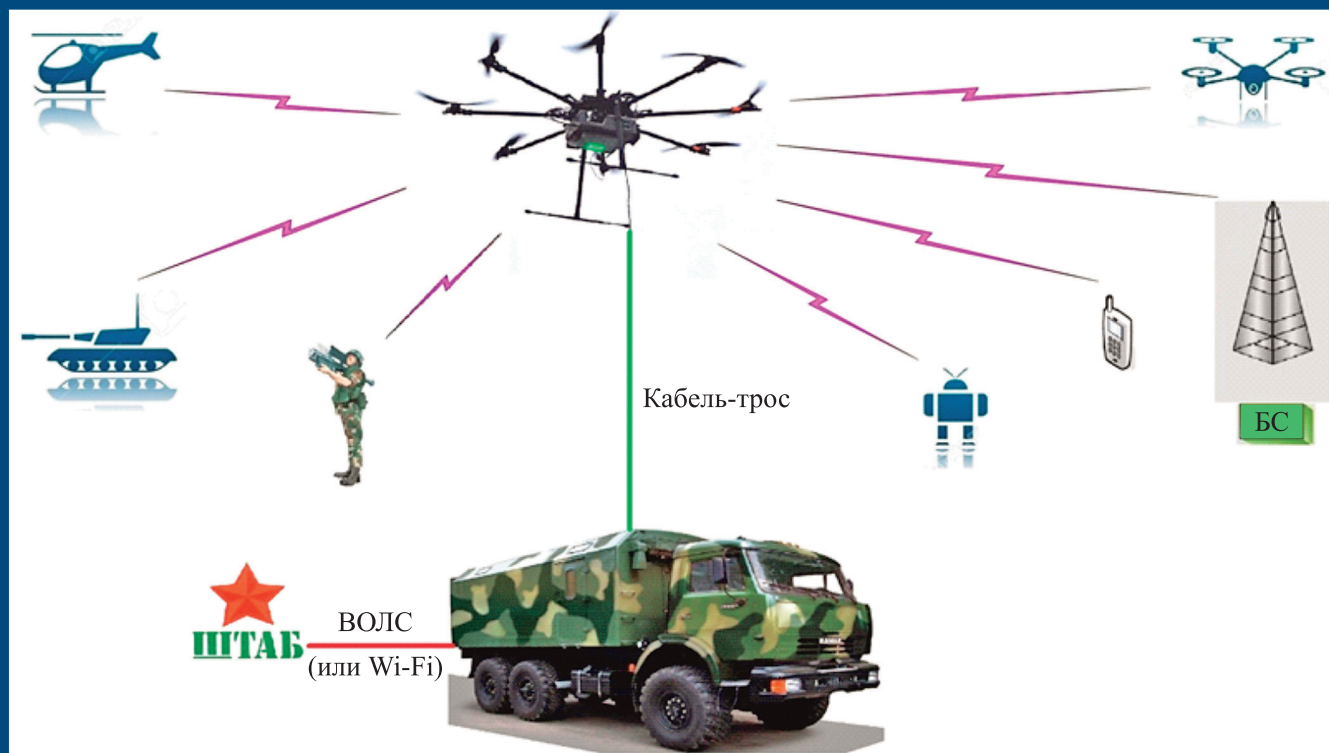
Possible algorithms of forecasting the lateral blocks to run out of fuel are considered related to the functioning of the multi-block first stage of launch vehicle «Soyuz-2». The results of the comparative analysis of accuracy characteristics of the work of the forecasting algorithms considered are given for certain emergency situations.

Keywords: launch vehicle, fuel use forecasting system, control algorithm, emergency situations.

Index of papers published in 2018. 85



Многофункциональные привязные высотные беспилотные платформы длительного функционирования



Назначение и области применения

- Мониторинг подвижных наземных и воздушных объектов
- Охрана критически важных объектов с применением на борту аппаратуры видео и радиолокационного наблюдения
- Создание сети сотовой связи на обширной территории с помощью привязных высотных платформ в качестве «LTE-вышек»
- Создание телекоммуникационной инфраструктуры в районах стихийных бедствий
- Локальные навигационные системы, успешно функционирующие в условиях отсутствия, ослабления или намеренного «глушения» сигналов спутниковой навигации
- Экологический мониторинг и мониторинг лесных пожаров

Основные технические характеристики

Высота подъема до 300 м
Передача мощности
«земля – борт» 20 кВт
Полезная нагрузка 30 кг
Время полета не менее 24 ч
Всепогодная эксплуатация –
температурный режим от – 50 до + 50°C
Ограничение по ветру не более 15 м/с
Время развертывания не более 10 мин

Наземное электропитание от трехфазной системы электроснабжения переменного тока 220/380 В частотой 50 или 400 Гц; в мобильном исполнении в полевых условиях в качестве источника электропитания может быть использована электростанция мощностью 15 кВт

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

☎ (495) 334-75-91, ✉ vishn@inbox.ru

<http://www.ipu.ru>



WWW.IPU.RU