

ISSN 1819-3161

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

2/2019

CONTROL  SCIENCES

Редакционный совет

Акад. РАН С.Н. Васильев, 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. Клочков, д-ра техн. наук С.А. Краснова, О.П. Кузнецов, В.В. Кульба, 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. Пашенко (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. Угольников (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. Бабикова

Отпечатано в ООО «Адвансед солюшнз»

Заказ № PB219

Подписано в печать
13.03.2019 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

2.2019

СОДЕРЖАНИЕ

Анализ и синтез систем управления

Честнов В.Н., Шатов Д.В. Синтез одномерных регуляторов по заданному показателю колебательности: модальный и H_∞ -подходы 2

Управление в социально-экономических системах

Райков А.Н., Бауэр В.П., Еремин В.В. Формирование системы контроля выполнения решений в процессе государственного проектного управления 9

Угольников Г.А. Методология и прикладные задачи управления устойчивым развитием активных систем 19

Леонидов А.В., Серебрянникова Е.Е. Исследование отклика на технологические шоки в многосекторной модели несовершенной конкуренции 30

Информационные технологии в управлении

Суховеров В.С. Система автоматической обработки тематически ориентированных текстов с терминологическим словарем в формате регулярных выражений 41

Управление техническими системами и технологическими процессами

Кузнецов Д.С., Котеленко С.А., Пятацкий В.Е. Идентификация операционной модели управления производственным комплексом . . . 47

Зак Ю.А. Построение расписаний работы сборочных конвейеров в мелко- и среднесерийном производстве 54

Глушенко А.И. Адаптивный нейросетевой настройщик ПИД-регулятора для управления нагревательными печами 60

Управление подвижными объектами и навигация

Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Принятие решения о выборе автономного необитаемого подводного аппарата для эффективного функционирования в группе 70

Хроника

Одиннадцатая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2018 80

Евгений Александрович Федосов (к 90-летию со дня рождения) 85

* * *

Contents and abstracts 88

СИНТЕЗ ОДНОМЕРНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПО ЗАДАННОМУ ПОКАЗАТЕЛЮ КОЛЕБАТЕЛЬНОСТИ: МОДАЛЬНЫЙ И H_∞ -ПОДХОДЫ¹

В.Н. Честнов, Д.В. Шатов

Для линейных одномерных объектов построены алгоритмы синтеза регуляторов по выходу, гарантирующие заданные или достижимые значения показателя колебательности и степени устойчивости, определяющей время регулирования. В процедурах синтеза применены как модальное управление, так и H_∞ -подход. Построены примеры, демонстрирующие, что стремление обеспечить степень устойчивости больше, чем расстояние от ближайшего левого нуля передаточной функции объекта до мнимой оси (даже для минимально-фазовых объектов!) приводит к весьма малым запасам устойчивости по фазе и модулю, что недопустимо на практике.

Ключевые слова: линейные системы, синтез регуляторов, показатель колебательности, степень устойчивости, время регулирования.

ВВЕДЕНИЕ

Вторая мировая война, несомненно, послужила сильному развитию теории и практики автоматического управления и, в частности, следящих систем. Сразу после ее окончания появляются фундаментальные монографии Г. Боде [1] и Л. Мак-Колла [2], последняя из которых и направлена на теорию следящих систем, которые в то время именовались сервомеханизмами. Само понятие показателя колебательности было введено впервые в закрытой в то время работе А. Холла [3]. В отечественной литературе это понятие появилось в статье В.В. Солодовникова [4], где был развит метод логарифмических амплитудно-частотных характеристик (ЛАЧХ) на случай, когда запас устойчивости системы оценивается не запасами по фазе и модулю, а собственно показателем колебательности. Надо сказать, что уже 70 лет назад из практики автоматического управления было хорошо известно, что стремление показателя колебательности M к единице (в следящих системах в контуре обязательно присутствует, по крайней мере, один чистый интегратор, и единица является начальным значением амплитудно-частотной характеристики (АЧХ)

замкнутой системы) соответствует уменьшению и исчезновению перерегулирования в переходной характеристике замкнутой системы. Этот постулат весьма эффективно использовался инженерами в практике проектирования следящих систем на протяжении этих последних 70 лет. Для минимально-фазовых нейтральных объектов (имеющих только устойчивые нули и не имеющих правых полюсов) подход к синтезу регуляторов, обеспечивающих заданный показатель колебательности, на основе метода ЛАЧХ был развит в работах [5, 6].

В настоящей работе для синтеза регуляторов с заданным показателем колебательности применяются метод модального управления (для минимально-фазовых нейтральных объектов) и H_∞ -подход (как для минимально-фазовых, так и для неминимально-фазовых и неустойчивых объектов). Кроме того, предлагается способ учета заданной степени устойчивости замкнутой системы, определяющей желаемое время регулирования.

Фундаментально важно, что время регулирования даже для линейных непрерывных минимально-фазовых объектов с регуляторами по измеряемому выходу ограничено снизу. Отметим, что для регуляторов по полному вектору состояния такой проблемы не существует [7]. Как отмечено в работах [8, 9], стремление увеличить быстродействие путем увеличения степени устойчивости замкнутой системы может приводить к регулятору по вы-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-08-01067).



ходу с очень малыми запасами устойчивости по фазе и модулю (большому показателю колебательности и малому радиусу запасов устойчивости), что недопустимо на практике. Для неминимально-фазовых объектов этот факт давно известен [10]. В настоящей работе построены примеры, демонстрирующие, что стремление обеспечить степень устойчивости больше, чем расстояние от ближайшего левого нуля объекта до мнимой оси (даже для минимально-фазовых объектов!) приводит к весьма малым запасам устойчивости по фазе и модулю (значительному показателю колебательности и незначительному радиусу запасов устойчивости [11]), что приводит к огромным выбросам (перерегулированию) в переходной характеристике замкнутой системы и совсем не приветствуется на практике.

Отметим, что в цикле статей А.Г. Александрова, открывающегося работами [11, 12], на основе модального управления строились одномерные регуляторы по измеряемому выходу, обеспечивающие заданный радиус запасов устойчивости и необходимое быстродействие (а также требуемую точность при действии ограниченного внешнего возмущения). Настоящая работа продолжает исследования, выполненные ранее [9, 11, 12], когда вместо радиуса запасов устойчивости для оценки робастности замкнутой системы используется показатель колебательности, более естественный и общепринятый в теории и практике следящих систем.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим объект управления, описываемый уравнением в форме «вход—выход»:

$$d(p)y(t) = b(p)u(t), \quad (1)$$

где $y(t)$ — регулируемая переменная, $u(t)$ — управляющее воздействие, $d(p)$ и $b(p)$ — заданные полиномы степеней n и $(n-1)$ оператора дифференцирования $p = d/dt$. Предполагается, что полиномы $d(p)$ и $b(p)$ не имеют общих корней (объект полностью управляем и наблюдаем).

Замкнем объект (1) стабилизирующим регулятором по выходу:

$$g(p)u(t) = r(p)(y^*(t) - y(t)), \quad (2)$$

где $y^*(t)$ — задающее воздействие, $y^*(t) - y(t) = \varepsilon(t)$ — измеряемая переменная (рассогласование, сигнал ошибки), а $g(p)$ и $r(p)$ — некоторые полиномы степени $n_c \leq n$ оператора p .

Определим передаточную функцию разомкнутой системы выражением

$$W(s) = \frac{b(s)r(s)}{d(s)g(s)} = W_o(s)W_c(s), \quad (3)$$

где $W_o(s) = b(s)/d(s)$ — передаточная функция объекта (1), $W_c(s) = r(s)/g(s)$ — передаточная функ-

ция регулятора (2), s — переменная преобразования Лапласа.

Выпишем, учитывая выражения (1)–(3), передаточную функцию замкнутой системы от задающего воздействия y^* к регулируемой переменной y [6]:

$$T(s) = \frac{b(s)r(s)}{d(s)g(s) + b(s)r(s)} = \frac{W(s)}{1 + W(s)}, \quad (4)$$

которую в западной литературе называют дополнительной функцией чувствительности [13–17]. Сама же функция чувствительности (в отечественной терминологии передаточная функция замкнутой системы по ошибке [6] от y^* к ε) имеет вид:

$$S(s) = \frac{d(s)g(s)}{d(s)g(s) + b(s)r(s)} = \frac{1}{1 + W(s)}. \quad (5)$$

Смысл термина «дополнительная» ясен из очевидного тождества $T(s) + S(s) = 1$.

Задача 1. Найти стабилизирующий регулятор (2) такой, чтобы:

$$\|T\|_\infty = \max_{0 \leq \omega < \infty} |T(j\omega)| = M \leq \gamma, \quad (6)$$

где γ — заданное или минимизируемое число. ♦

Слева в соотношении (6) стоит H_∞ -норма передаточной функции $T(s)$ [15], которая по определению [5, 6] совпадает с показателем колебательности M (ω — круговая частота, $j = \sqrt{-1}$).

Заметим, что регулятор, найденный на основе соотношения (6), может не обеспечивать желаемого быстродействия замкнутой системы, поэтому возникает

Задача 2. Найти стабилизирующий регулятор (2) такой, чтобы помимо условия (6) корни λ_i ,

$i = \overline{1, n+n_c}$ характеристического полинома замкнутой системы $D_c(s) = d(s)g(s) + b(s)r(s)$, удовлетворяли условию

$$\operatorname{Re} \lambda_i \leq -\beta, \quad i = \overline{1, n+n_c},$$

где $\beta \geq 0$ — заданная степень устойчивости замкнутой системы (1), (2). ♦

Известна приближенная оценка времени регулирования t_p (см. работы [6, 17–19]), когда доминирующие корни $D_c(s)$ простые (не кратные): $t_p \approx 3/\beta$.

В работе [17] в числителе этой последней формулы вместо коэффициента 3 стоит коэффициент 4,6, что соответствует оценке времени регулирования, когда измеряемый выход объекта отличается от установившегося значения не более чем на 1%. Указанный в этой формуле авторами коэффициент 3 соответствует времени регулирования для 5%-й трубки, что более распространено в инженерной среде.

Решение поставленных задач в настоящей работе опирается на два подхода. Первый из них — модальный, он применим, когда объект управления (1) минимально-фазовый (все корни полинома $b(s)$ левые) и нейтральный (один корень полинома $d(s)$ нулевой, а остальные левые). Второй — H_∞ -подход, при котором объект управления (1) может быть неминимально-фазовым (некоторые (или все) корни полинома $b(s)$ правые) и неустойчивым (некоторые (или все) корни полинома $d(s)$ правые).

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ. МОДАЛЬНЫЙ ПОДХОД

В данном параграфе предполагается, что полином $b(s)$ устойчив, т. е. объект (1) минимально-фазовый, а характеристический полином объекта $d(s)$ имеет один нулевой корень при остальных устойчивых (объект нейтральный).

Используя предположения о гурвицевости полинома $b(s)$ и что его степень равна $(n - 1)$, выберем полином $g(s)$ регулятора (2) таким образом: $g(s) = b(s)$ [11] ($n_c = n - 1$), тогда передаточная функция (3) разомкнутой системы примет вид:

$$W(s) = \frac{b(s)r(s)}{d(s)g(s)} = \frac{r(s)}{d(s)}, \quad (7)$$

причем характеристический полином замкнутой системы $D_c(s) = b(s)[d(s) + r(s)] = b(s)D(s)$ содержит полином $b(s)$ в качестве множителя. Передаточная функция замкнутой системы (4) примет вид:

$$\begin{aligned} T(s) &= \frac{b(s)r(s)}{d(s)g(s) + d(s)r(s)} = \\ &= \frac{r(s)}{d(s) + r(s)} = \frac{r(s)}{D(s)}. \end{aligned} \quad (8)$$

В этом выражении полином $r(s)$ регулятора необходимо выбрать так, чтобы выполнялось целевое условие (6). Укажем на один из возможных путей решения этой задачи. Пусть $-\lambda_1, -\lambda_2, \dots, -\lambda_n$ — корни желаемого полинома $D(s)$ знаменателя передаточной функции (8): $D(s) = (s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \dots (s + \lambda_n)$, $\operatorname{Re} \lambda_i > 0$, $i = \overline{1, n}$. Представим искомым полином $r(s)$ регулятора так $r(s) = r_0(s + z_2)(s + z_3) \dots (s + z_n)$, где $r_0, z_2, \dots, z_n$ некоторые числа $\operatorname{Re} z_i > 0$, $i = \overline{2, n}$, подлежащие определению. В этом случае выражение (8) примет вид

$$T(s) = \frac{r_0(s + z_2)(s + z_3) \dots (s + z_n)}{(s + \lambda_1)(s + \lambda_2) \dots (s + \lambda_n)}. \quad (9)$$

Если в выражении (9) положить $r_0 = \lambda_1 > 0$; $z_i = \lambda_i$, $i = \overline{2, n}$, то передаточная функция замкну-

той системы переходит в передаточную функцию инерционного звена

$$T(s) = \frac{\lambda_1}{s + \lambda_1} = \frac{1}{(1/\lambda_1)s + 1} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (10)$$

с единичным коэффициентом усиления и постоянной времени $\tau = 1/\lambda_1$.

Заметим, однако, что такой выбор $z_i = \lambda_i$, $i = \overline{2, n}$ далеко не произволен. Действительно, из тождества $D(s) = d(s) + r(s)$ при условии, что $d(s) = s(s + s_2) \dots (s + s_n)$, $\operatorname{Re} s_i > 0$, $i = \overline{2, n}$, следует $D(\lambda_i) = d(\lambda_i) + r(\lambda_i) = 0$. И поскольку $r(\lambda_i) = r(z_i) = 0$, то $d(\lambda_i) = 0$, $i = \overline{2, n}$. Это означает, что корни полинома $D(s)$ должны совпадать с корнями полинома $d(s)$ объекта (1), начиная со второго. Очевидно, что передаточная функция (7) разомкнутой системы в таком случае сводится к виду $W(s) = \lambda_1/s$, т. е. к чистому интегратору с коэффициентом усиления λ_1 , который назначает проектировщик. Переходный процесс в замкнутой системе (10) при подаче ступенчатого задающего воздействия $y^*(t) = \operatorname{const}$ протекает монотонно и без перерегулирования. Время регулирования при этом составляет величину $t_p = 3\tau = 3/\lambda_1$. Наконец, максимум АЧХ замкнутой системы (10) составляет величину, равную единичному коэффициенту усиления звена. Таким образом, замкнутая система имеет показатель колебательности $M = 1$ и время регулирования $t_p = 3/\lambda_1$, назначаемое проектировщиком. Отметим также, что запасы устойчивости по фазе и модулю у синтезированной системы весьма высоки ($\varphi_3 = 90^\circ$ и $L \rightarrow \infty$), поскольку годограф Найквиста передаточной функции (3) расположен на отрицательной части мнимой полуоси плоскости годографа.

Замечание 1. Подчеркнем, что оценка времени регулирования $t_p = 3/\lambda_1$ относится только к случаю изменения задающего воздействия y^* . В случае действия возмущающего воздействия, приложенного не аддитивно с управлением, а также ненулевых начальных условиях этот показатель может быть существенно другим, поскольку в переходном процессе будут еще присутствовать ненулевые корни полиномов $d(s)$, $b(s)$.

Замечание 2. При компенсации комплексных корней полиномов $b(s)$ и $d(s)$ с малыми коэффициентами демпфирования следует проявлять известную осторожность [13, 20, 21].

Замечание 3. В отличие от работы [22], в которой рассматривались так называемые регуляторы с двумя степенями свободы, где дополнительно, кроме сигнала рассогласования (ошибки), доступен непосредственному измерению задающий сигнал (или выход объекта), в нашем случае измерению доступен только сигнал ошибки, что довольно часто встречается в практике следящих систем.



3. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ. H_∞ -ПОДХОД

В этом параграфе объект управления может быть и неминимально-фазовым и неустойчивым. Для решения H_∞ -проблемы (6) приведем уравнения объекта (1) и регулятора (2) к стандартному виду, принятому в литературе [13–27]. Пусть (A, B, C) — тройка известных матриц, соответствующих описанию объекта (1) в пространстве состояний:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu, \quad y = Cx, \\ x &\in R^n, \quad u \in R^1, \quad y \in R^1.\end{aligned}\quad (11)$$

Опишем регулятор (2) также уравнениями состояния:

$$\begin{aligned}\dot{x}_c &= A_c x_c + B_c(y^* - y), \quad u = C_c x_c + D_c(y^* - y), \\ x_c &\in R^n,\end{aligned}\quad (12)$$

где A_c, B_c, C_c, D_c — искомые матрицы регулятора, а x и x_c — векторы состояния объекта и регулятора соответственно.

Запишем уравнения обобщенного объекта [24] в виде:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_{06}x + B_{06}w, \quad z = C_1x + D_{11}y^* + D_{12}u, \\ \varepsilon &= C_2x + D_{21}y^* + D_{22}u,\end{aligned}\quad (13)$$

где $w^T = [y^* \ u]$ — вектор внешних воздействий, действующих на объект, $z = y$ — регулируемая переменная объекта; $\varepsilon = y^* - y$ — измеряемая переменная (входной сигнал регулятора). Сравнивая выражения (11)–(13), заключаем, что

$$\begin{aligned}A_{06} &= A, \quad B_{06} = [0 \ B], \quad A_{06} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}, \\ D_{06} &= \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}, \quad C_1 = C; \quad C_2 = -C, \\ D_{11} &= D_{12} = 0; \quad D_{21} = 1; \quad D_{22} = 0.\end{aligned}\quad (14)$$

При этом передаточная функция обобщенного объекта (14), (15), замкнутого регулятором (12), от y^* к z совпадает с исходной передаточной функцией $T(s)$ — см. формулы (4), (6). И таким образом, проблема (6) — это стандартная задача H_∞ -оптимизации [13–15, 19–21, 24].

Отметим одну особенность уравнений (13), (14): выражение для регулируемой переменной не содержит управляющего воздействия, поэтому такая H_∞ -задача (6) является вырожденной [19, 23] и не может быть решена известным 2-Риккати-подходом [24]. Для решения вырожденной проблемы (6) можно применить метод на основе линейных

матричных неравенств [25, 26], реализованный в MATLAB-пакете Robust Control Toolbox [27].

Следующий алгоритм реализует численное решение задач 1 и 2. Он опирается на применение широко известных стандартных процедур, разработанных в среде MATLAB [27], и формально подобен предложенному в работе [19], однако с другим внутренним содержанием:

1) формируем матрицы обобщенного объекта (14); для решения задачи 1 они имеют вид (14), а в случае задачи 2: $A_{06} = A + \beta I$, где $\beta \geq 0$ — заданная степень устойчивости, а символ I — единичная матрица соответствующего размера [19];

2) строим системную матрицу обобщенного объекта: $P = \text{ltisys}(A_{06}, B_{06}, C_{06}, D_{06})$;

3) определяем оптимальное значение $\gamma = \gamma_{opt}$ из (6) с помощью процедуры $\gamma_{opt} = \text{hinflmi}(P, [m_2, m])$, где $m_2 = m = 1$ — число входов и выходов регулятора соответственно;

4) выбираем $\gamma \geq \gamma_{opt}$ — заданный показатель колебательности и ищем системную матрицу смещенного регулятора K , которая является решением задач 1 и 2, для чего применяется процедура $[\gamma, K] = \text{hinflmi}(P, [m_2, m], \gamma, \varepsilon)$, где ε — заданная точность вычисления γ ;

5) по системной матрице смещенного регулятора K находим матрицы его уравнений состояния: $[\tilde{A}_c, B_c, C_c, D_c] = \text{ltiss}(K)$, где в случае решения задачи 2 матрица $\tilde{A}_c$ представляет собой смещенную матрицу регулятора; находим искомую матрицу регулятора (12) $A_c = \tilde{A}_c - \beta I$ (в случае задачи 1 $A_c = \tilde{A}_c$ при $\beta = 0$). Остальные матрицы регулятора B_c, C_c, D_c остаются без изменений [19];

6) формируем передаточную функцию регулятора (2) как

$$W_c(s) = \frac{r(s)}{g(s)} = C_c(sI - A_c)^{-1}B_c + D_c.$$

Строим частотные характеристики передаточных функций (3) и (4).

По годографу Найквиста $W(j\omega)$ находим запасы устойчивости (по фазе и модулю, а также радиус запасов устойчивости) синтезированной системы.

По характеристике $T(j\omega)$ определяем показатель колебательности системы как максимальное значение ее модуля для всех вещественных частот ω . Дополнительно строим переходные процессы в замкнутой системе (11), (12) и определяем фактическое время регулирования и перерегулирование.

Заметим, что решение задачи 1 с помощью H_∞ -подхода имеет необходимый и достаточный характер по отношению к параметрам регулятора, а решение задачи 2 только достаточный.

4. О ДОСТИЖИМОМ БЫСТРОДЕЙСТВИИ И НЕГРУБОСТИ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ВЫХОДУ

Данный параграф работы (как и § 5) имеет самостоятельное значение и непосредственно не связан с результатами § 2.

Техника модального управления чрезвычайно популярна среди инженеров и исследователей. Известно, что модальное управление позволяет разместить корни характеристического полинома замкнутой системы $D_{cl}(s)$ в произвольных точках комплексной плоскости. Однако при инженерном подходе к синтезу желательно, если возможно, обеспечить и значительный радиус запасов устойчивости. Этот радиус обозначается r и определяется как максимальный радиус круга с центром в точке $(-1, j0)$, который годограф Найквиста системы (3) не пересекает [11]. Для выполнения условия $r \rightarrow 1$ необходимо в минимально-фазовом случае иметь $g(s) = b(s)$ [11]. Радиус r может быть найден, используя H_∞ -норму функции чувствительности (5): $r = 1/\|S\|_\infty$ [15, 20].

Рассмотрим объект управления с передаточной функцией

$$W_o(s) = \frac{k_0(s+1/\tau)}{s(s+1/T)}, \quad k_0 > 0, \quad \tau > 0, \quad T > 0. \quad (15)$$

Требуется найти передаточную функцию линейного регулятора по измеряемому выходу

$$W_c(s) = \frac{r_1 s + r_0}{g_1 s + g_0} \quad (16)$$

такую, что корни желаемого характеристического полинома замкнутой системы $D_{cl}^*(s)$:

$$\lambda_1 = -1/(a_1 T), \quad \lambda_2 = -1/(a_2 T), \quad \lambda_3 = -1/(a_3 T), \\ a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_3 > 0.$$

Сформируем модальное тождество $D_{cl}(s) = D_{cl}^*(s)$:

$$s\left(s + \frac{1}{T}\right)(g_1 s + g_0) + k_0\left(s + \frac{1}{\tau}\right)(r_1 s + r_0) = \\ = k_0\left(s + \frac{1}{a_1 T}\right)\left(s + \frac{1}{a_2 T}\right)\left(s + \frac{1}{a_3 T}\right),$$

где слева выписан характеристический полином замкнутой системы (15), (16), а справа — желаемый полином. Разрешая это тождество относительно коэффициентов регулятора, получим:

$$r_0 = \frac{\tau}{a_1 a_2 a_3 T^3}, \\ g_0 = \frac{k_0}{\tau} + \frac{k_0 \tau^2 T}{T - \tau} \left(\frac{1}{a_1 T} - \frac{1}{\tau}\right) \left(\frac{1}{a_2 T} - \frac{1}{\tau}\right) \left(\frac{1}{a_3 T} - \frac{1}{\tau}\right), \\ r_1 = \frac{\tau}{a_1 a_2 a_3 T^3} \left(1 - \frac{T}{T - \tau} (1 - a_1)(1 - a_2)(1 - a_3)\right), \\ g_1 = k_0. \quad (17)$$

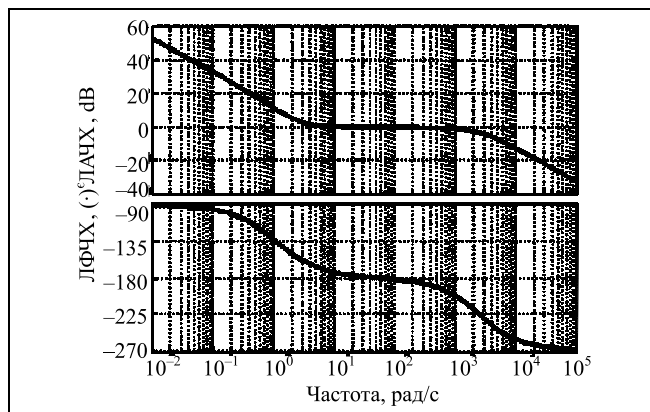


Рис. 1. Логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы (15), (16) при модальном подходе

Зададимся значениями $k_0 = 10$, $\tau = 0,5$, $T = 1$ и $a_1 = 0,25$, $a_2 = 0,025$, $a_3 = 0,015$. Такой выбор a_i , $i = 1, 2, 3$, обеспечивает степень устойчивости $\beta = |\lambda_1| = 4$, что в два раза больше модуля нуля объекта $1/\tau = 2$.

С помощью выражения (17) найдем регулятор (16) с полиномами: $r(s) = -2,3497 \cdot 10^3 s + 5,333 \cdot 10^3$, корень которого равен 2,2698 — регулятор неминимально-фазовый; $g(s) = 10s + 2,46 \cdot 10^4$. Такой регулятор устойчив и обеспечивает значение показателя колебательности $M = \|T\|_\infty = 22$, H_∞ -норма функции чувствительности $\|S\|_\infty = 22,9$, что соответствует радиусу запасов устойчивости [15, 20] $r = 1/\|S\|_\infty = 0,0437$ — это недопустимо мало. Последнее означает, что малы запасы и по фазе $\phi_3 = 7,48^\circ$, и по модулю $L \approx 1,046$ (увеличение коэффициента усиления, например, объекта управления, в это число раз приводит к неустойчивости). На рис. 1 изображена частотная характеристика разомкнутой системы (15), (16), имеющая характерный вид с пологим участком на средних частотах (подробнее см. § 5).

Переходная характеристика системы (15), (16) с таким регулятором имеет огромные выбросы по сравнению с единицей: отрицательный до $-15,4$ и положительный до $2,55$. Она приведена на рис. 2. Такая система практически неработоспособна.

Легко проверить, что выбор $a_1 = 1$, $a_2 T = \tau$, $(a_3 T)^{-1} = \lambda_1$ приводит к регулятору из § 2.

5. О ДОСТИЖИМОМ БЫСТРОДЕЙСТВИИ И НЕГРУБОСТИ H_∞ -ПОДХОДА

Решим задачу 2 для объекта (15) при тех же значениях $k_0 = 10$, $\tau = 0,5$, $T = 1$. Объект (15) с этими параметрами имеет нуль $z = -2$ и полюсы в точках $p_1 = 0$ и $p_2 = -1$. Зададимся степенью устойчивости

$\beta = 4$ (как и ранее в § 4), в два раза превышающей значение модуля нуля z . Решение задачи синтеза на основе техники § 3 дает регулятор:

$$W_c(s) = \frac{7,09 \cdot 10^5 (s - 2)}{s + 7,57 \cdot 10^6},$$

который неминимально-фазовый и имеет нуль в точке $z_c = 2$ и полюс в точке $p_c = -7,57 \cdot 10^6$, корни λ_i полинома $D_c(s)$ имеют значения: $-4,735 \cdot 10^5$; $-9,993$; -6 . Значение показателя колебательности $M = \|T\|_\infty$ составило 15, при этом $\|S\|_\infty = 16$. Радиус запасов устойчивости $r = 1/\|S\|_\infty = 0,06$, что говорит о практической неработоспособности данного регулятора (система имеет запасы устойчивости по фазе $\varphi_3 = 7,9^\circ$, по модулю $L \approx 1,066$). На рис. 3 приведены логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы (3), которые имеют характерный пологий участок в области средних частот. Как показывают многочисленные эксперименты, чем большую степень устойчивости β (по сравнению с минимальным расстоянием от нуля объекта до мнимой оси) мы хотим обеспечить, тем ближе этот пологий участок к оси частот (почти параллелен ей), что приводит к весьма малым запасам устойчивости по фазе и модулю (малому радиусу запасов устойчивости). Отметим, что обнаружить этот эффект по годографу Найквиста невозможно. Переходная характеристика такой замкнутой системы имеет огромные (по сравнению с единицей) как отрицательный (значение $y = -15$), так и положительный (значение $y = 2,54$) выбросы (рис. 4). Естественно, как и в § 4, такой регулятор не может быть применен на практике. Заметим, что при $\beta = |z| = 2$ такого эффекта не наблюдается.

Авторы построили аналогичные примеры для объекта третьего порядка с комплексными устойчивыми нулями, в которых данное явление малых запасов устойчивости также имеет место. Анализируя представленные примеры синтеза, легко заметить, что причиной малых запасов устойчивости является собственно регулятор, который при большой желаемой степени устойчивости становится неминимально-фазовым с неустойчивым полиномом числителя его передаточной функции. Можно подумать, что это явление определяется всего лишь методом синтеза регулятора. Однако легко привести примеры для тех же объектов, когда, например, LQ -оптимизация по выходу с наблюдателем состояния приводит к аналогичному эффекту. Таким образом, быстродействие замкнутой системы ограничено расстоянием от ближайшего нуля объекта до мнимой оси. Строгое математическое доказательство этого факта — предмет дальнейших исследований авторов. В системе без нулей, когда числитель $b(s) = k_0 = \text{const}$, такого ограничения нет.

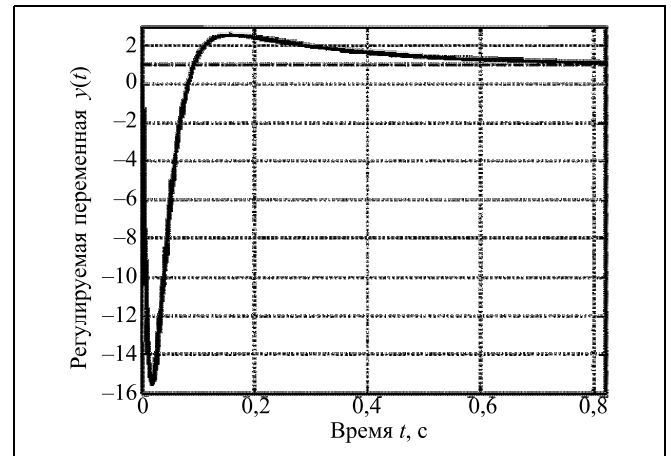


Рис. 2. Переходная характеристика системы (15), (16) при модальном подходе

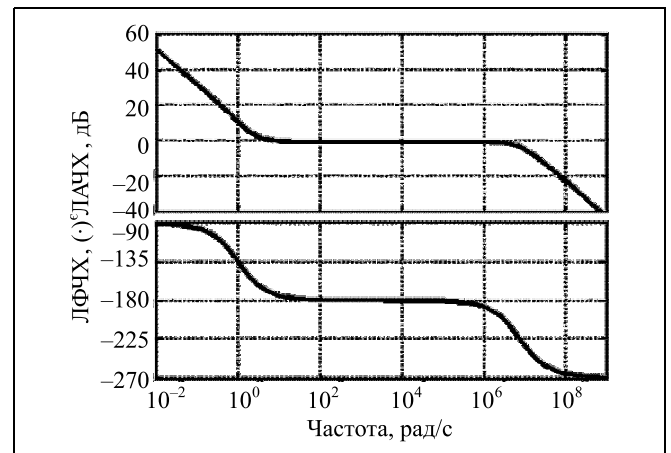


Рис. 3. Логарифмические частотные характеристики разомкнутой системы (15)–(17) при H_∞ -подходе

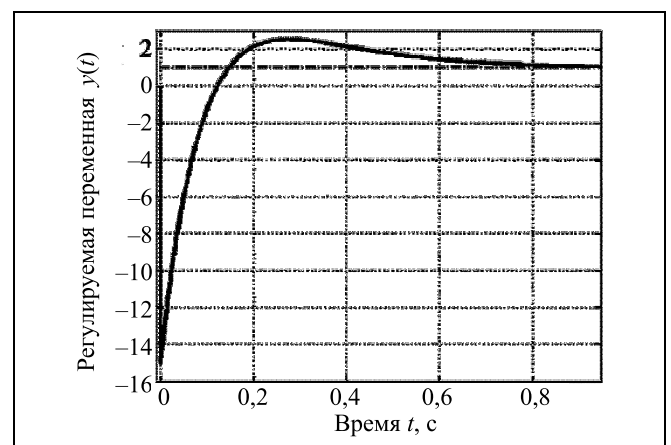


Рис. 4. Переходная характеристика системы (15), (16) при H_∞ -подходе

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача синтеза регуляторов для линейных одномерных объектов по заданному или достижимому показателю колебательности, а также другая задача, где дополнительно обеспечивается заданная степень устойчивости системы, определяющая желаемое время регулирования. Эти задачи решаются на основе модального управления и H_∞ -подхода.

Для модального синтеза описан способ выбора желаемого полинома, разрешающего задачи синтеза. Этот подход справедлив только для минимально-фазовых и нейтральных объектов без правых нулей и полюсов.

В общем случае, когда объект может быть и неминимально-фазовым и неустойчивым, дано решение задач синтеза на основе H_∞ -теории. При этом при решении первой из указанных задач синтеза по собственному показателю колебательности этот подход приводит к неупрощаемому регулятору (задача решается с точностью до необходимых и достаточных условий), который обеспечивает минимально возможное значение показателя колебательности. Приведен алгоритм синтеза на основе широко распространенного в инженерной среде MATLAB-пакета Robust Control Toolbox [27], где применяется техника линейных матричных неравенств [25, 26].

Приведен фундаментально важный факт, состоящий в том, что стремление обеспечить степень устойчивости замкнутой системы больше, чем расстояние от ближайшего левого нуля объекта до мнимой оси, приводит к негрубости (малому радиусу запасов устойчивости) даже в минимально-фазовом случае (независимо от метода расчета регулятора) и, как следствие, к огромным выбросам в переходной характеристике замкнутой системы, что недопустимо на практике.

Дальнейшее развитие результатов работы состоит в исследовании задач, в которых дополнительно обеспечивается заданная ошибка слежения при действии внешнего полигармонического возмущения и задающего воздействия, ограниченных по модулю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бодэ Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. — М.: Гос. изд-во иностранной литературы, 1948. — 641 с.
2. МакКол Л.А. Основы теории сервомеханизмов: пер. с англ. под ред. Я.З. Цыпкина. — М.: Гос. изд-во иностранной литературы, 1947. — 154 с.
3. Hall A.C. The Analysis and Synthesis of Linear Servomechanisms. — Cambridge: MIT Press, 1943. — 193 p.
4. Солодовников В.В. Применение метода логарифмических частотных характеристик к исследованию устойчивости и к

- оценке качества следящих и регулируемых систем // Автоматика и телемеханика. — 1948. — Т. 9, № 2. — С. 85—103.
5. Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. — Л.: Судостроение, 1968. — 348 с.
6. Бесекерский В.А., Понов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1975. — 768 с.
7. Anderson B.D.O., Moore J.B. Optimal Control. Linear Quadratic Methods. — N.-Y.: Prentice Hall, 1989. — 380 p.
8. Åström K.J., Murray R.M. Feedback systems: an introduction for scientists and engineers. — New Jersey: Princeton University Press, 2008. — 396 p.
9. Честнов В.Н. Синтез робастных H_∞ -регуляторов многомерных систем по заданной степени устойчивости // Автоматика и телемеханика. — 2007. — № 3. — С. 199—205.
10. Горовиц А.М. Синтез систем с обратной связью. — М.: Советское радио, 1970. — 600 с.
11. Александров А.Г. Синтез регуляторов по показателям точности и быстродействию. I. Минимально-фазовые одномерные объекты // Автоматика и телемеханика. — 2015. — № 5. — С. 27—42.
12. Александров А.Г. Синтез регуляторов по показателям точности и быстродействию. II. Неминимально-фазовые объекты // Там же. — 2017. — № 6. — С. 3—17.
13. Zhou K., Doyle J.C., Glover K. Robust and Optimal Control. — New Jersey: Prentice-Hall, 1996. — 596 p.
14. Zhou K., Doyle J.C. Essentials of Robust Control. — New Jersey: Prentice-Hall, 1998. — 411 p.
15. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable feedback control. Analysis and design. — N.-Y.: John Wiley and Sons, 2006. — 595 p.
16. Anderson B.D.O., Moore J.B. Linear optimal control. — New Jersey: Prentice-Hall, 1971. — 399 p.
17. Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. — М.: Мир, 1977. — 650 с.
18. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Линейные системы. — СПб.: Питер, 2005. — 336 с.
19. Честнов В.Н. Синтез H_∞ -регуляторов многомерных систем заданной точности и степени устойчивости // Автоматика и телемеханика. — 2011. — № 10. — С. 170—185.
20. Doyle J.C., Francis B.A., Tannenbaum A.R. Feedback Control Theory. — N.-Y.: Macmillan, 1990. — 202 p.
21. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. — NC: ISA, 2006. — 460 p.
22. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 360 с.
23. Садомцев Ю.В. Решение задач H_∞ -оптимизации на основе принципа разделения // Автоматика и телемеханика. — 2012. — № 1. — С. 62—81.
24. Doyle J.C., Glover K., Khargonekar P.P., Francis B.A. State-space solution to standard H_2 and H_∞ control problem // IEEE Trans. Autom. Contr. — 1989. — Vol. 34, N 8. — P. 831—846.
25. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E., Balakrishnan V. Linear matrix inequality in system and control theory. — Philadelphia: SIAM, 1994. — 193 p.
26. Gahinet P., Apkarian P. A linear matrix inequality approach to H_∞ control // Int. J. Robust and Nonlinear Control. — 1994. — Vol. 4. — P. 421—448.
27. Balas G.J., Chiang R.Y., Packard A., Safonov M.G. Robust Control Toolbox 3. User's guide. — Natick (Mass.). The Math Works, Inc., 2010. — 178 p.

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

Честнов Владимир Николаевич — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, vnchest@yandex.ru,

Шатов Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, dvshatov@gmail.com,

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

Поступила в редакцию 29.10.2018, после доработки 28.11.2018.

Принята к публикации 12.12.2018.

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПРОЕКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ¹

А.Н. Райков, В.П. Бауэр, В.В. Еремин

В рамках стратегии перевода государственных программ Российской Федерации на проектные принципы рассмотрены проблемы проектного управления, предложены продвинутое методы решения данных проблем. Разработан алгоритм формирования системы содержательного контроля реализации проектов. Показана возможность формирования системы предварительного контроля, позволяющей определять приоритетность проектов, объемы необходимых для их выполнения ресурсов и реальные сроки их выполнения. Обосновано формирование системы контроля подготовки к реализации проекта, позволяющей отсеивать недобросовестных подрядчиков и отбирать эффективных исполнителей проекта. Построены алгоритмы контроля показателей реализации проекта, а также контроля параметров эффективности деятельности разработчиков проекта.

Ключевые слова: управление проектами, планирование, национальные проекты, государственное управление, эффективность.

ВВЕДЕНИЕ

Современная система государственного управления в России сталкивается с чрезвычайно сильными и опасными вызовами. Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 [1] определены амбициозные и масштабные цели развития страны. Идет становление стратегического планирования, формируются национальные проекты, создается система распределенных центров развития [2]. В стране на современном международном уровне развивается цифровая экономика. Вместе с тем последнее время страна столкнулась с масштабными антироссийскими санкциями, демографическими проблемами, большой волатильностью курса рубля, нехваткой квалифицированных кадров, затрудненным доступом к современным технологиям во многих отраслях промышленности. Приведенный перечень далеко не полон. Вызовы нового качества требуют нового качества управления, концентрации финансов, уси-

лий и талантов на решении наиболее важных задач в условиях нехватки ресурсов и достаточно сильного внешнего взаимодействия.

Механизмом формирования требуемого уровня качества является проектное управление. «Проект» — комплекс взаимосвязанных мероприятий, направленных на достижение уникальных результатов в условиях временных и ресурсных ограничений. «Проектная деятельность» — деятельность, связанная с инициированием, подготовкой, реализацией и завершением проектов (программ) [3].

Результатом проектной деятельности является выполнение сформированных решений в срок, не допуская нецелевого или неэффективного использования средств или снижения качества (количества) результатов, запланированных к получению. Проектная деятельность в отличие от другой плановой организации работ, например, процессной, характеризуется повышенными рисками. В связи с этим чрезвычайно важен вопрос формирования адекватной существующим вызовам системы контроля реализации проектов.

Вопросы государственного управления, в том числе в контексте проектного управления, рассматривались большим числом авторов от Кейнса [4] до современных зарубежных и российских ис-

¹ Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финансовому университету при Правительстве Российской Федерации.

следователей [5—7] и др. Показывается, что построение успешной системы контроля во многом обусловлено построением всего цикла управления, включая этапы планирования, организации, мотивации и контроля жизненного цикла проекта.

Отсутствие эффективной системы контроля реализации проектов в определенной степени сводит на нет саму идею проектного управления. Если необходимой системы контроля нет, фактические результаты принятия управленческих решений в рамках проекта могут значительно и негативно отличаться от запланированных. Возможен перерасход ресурсов, выделенных на реализацию проекта, их нецелевое использование, отсутствие запланированных результатов. Следовательно, отсутствие или неэффективность системы контроля реализации проектов является прямой угрозой национальной безопасности страны.

Вопросы формирования системы контроля реализации проектов и проблемы проектного управления рассматривались в работах многих отечественных и зарубежных авторов [8—13] и др.

В данной же работе формирование необходимой системы контроля рассматривается именно с учетом сложных современных экономических реалий, с которыми в последнее время столкнулась Российская Федерация. Эти реалии устанавливают еще более жесткие требования к асимметричности решений, принимаемых в ответ на возникающие вызовы. Например, система проектного контроля должна обеспечивать больший, чем ранее эффект при меньших, чем ранее, объемах финансирования национальных проектов. Кроме этого, в настоящей работе рассмотрено формирование системы контроля выполнения решений на разных стадиях процесса проектного управления, включая самые ранние из них.

1. НОРМАТИВНАЯ БАЗА ПРОЕКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Для организации проектной деятельности Правительством Российской Федерации в последнее время был принят ряд нормативных актов и создан ряд специализированных организаций. Так, был образован Совет при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам. В настоящее время (19 июля 2018 г.) Совет преобразован в Совет при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам (принято «Положение о Совете при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам») [14].

Принято постановление Правительства Российской Федерации от 15.10.2016 г. «Об организации проектной деятельности в Правительстве Российской Федерации», на основе которого создан

Департамент проектной деятельности Правительства Российской Федерации, выполняющий функции федерального проектного офиса, разработан ряд методических указаний, описывающих различные стадии процесса осуществления проектной деятельности [15]. В части государственных программ Российской Федерации утверждены методические указания по их разработке и реализации, определяющие структуру государственной программы, требования к ее содержанию, мониторингу, контролю реализации [16]. Утвержден порядок разработки, реализации и оценки эффективности государственных программ Российской Федерации [17] и актуализирован перечень государственных программ [18].

Все этапы проектной деятельности описываются достаточно широким набором методических рекомендаций. В частности, соответствующими рекомендациями описываются оценка и иные контрольные мероприятия реализации приоритетных проектов [19], процедуры и этапы мониторинга исполнения приоритетных проектов и программ [20], управление изменениями приоритетных проектов (программ) [21], подготовка сводного и рабочего планов приоритетного проекта (программы) [22] и пр. Отметим и существующие ГОСТы, такие как национальный стандарт Российской Федерации, устанавливающий требования к управлению портфелем проектов [23], стандарт, устанавливающий требования к управлению программой [24] и пр. Отдельно отметим стандарт, устанавливающий требования к компетентности менеджеров проектов [25].

2. ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТНОГО УПРАВЛЕНИЯ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ РЕШЕНИЯ

Анализ нормативных актов позволяет сделать первоначальный вывод о том, что они регламентируют и формализуют все этапы осуществления проектной деятельности, способствуя тем самым повышению ее эффективности. Но на практике иногда эффективность осуществления проектной деятельности не соответствует ожиданиям относительно ее уровня, возникающим после анализа перечисленных нормативных актов. Так, в 2017 г. Счетная палата Российской Федерации оценила эффективность исполнения государственной программы «Развитие здравоохранения» на уровне «ниже среднего» [26]. Степень достижения целевых показателей по госпрограмме «Развитие науки и технологий» на 2013—2020 гг. в 2016 г. составила 69,6 %, а по программе «Развитие образования» — 77,8 % [27]. Существуют вопросы и к эффективности выполнения других программ.

С учетом того, что наличие достаточно детально прописанной нормативной базы и созданных спе-



специализированных организаций, не позволило избежать проблем с эффективностью планирования и выполнения государственных программ вполне возможно возникновение аналогичных проблем и в процессе реализации национальных проектов.

Особенно остро вопросы эффективности реализации национальных проектов встают и с учетом требуемого объема их финансирования. Так, в программу правительства на 2019—2024 гг. заложено 12 национальных проектов, расходы на которые составят десятки трлн рублей. Кроме этого, только в 2019 г. предлагается зарезервировать 375 млн. руб. на стимулирование федеральных госслужащих, участвующих в реализации национальных и федеральных проектов. Подобное стимулирование должно сопровождаться ростом эффективности работы соответствующих государственных служащих.

Анализ нормативных актов, регламентирующих реализацию национальных проектов, позволил выявить ряд проблемных участков, в перспективе способных снизить эффективность реализации национальных проектов.

Прежде всего отметим, что несмотря на наличие в стране богатой истории и опыта государственного планирования, множества ныне действующих нормативных правовых и иных нормативных документов, наблюдается высокий уровень хаотичности планирования национальных проектов. Если в середине 1990-х гг. обязательной нормой была разработка и утверждение специальной концепции программы федерального уровня, то в настоящее время она заменяется паспортом, который формируется без должной маркетинговой, экспертной, научной и оптимизационной проработки. Учитывая, что проектная деятельность сопряжена с повышенными рисками, это будет сказываться на качестве контроля их исполнения.

Методические указания, описывающие этапы реализации национальных проектов, недостаточно алгоритмизированы. Анализ их текста позволяет выявить некоторую расплывчатость. Так, например, в методических указаниях по оценке реализации приоритетных проектов не прописаны конкретные критерии и алгоритм формирования экспертной группы. Критерии исключения и добавления отдельных экспертов, критерии определения веса оценки, данной тем или иным экспертом.

Экспертные оценки при всей их необходимости зачастую представляют собой достаточно субъективное мнение, которое следует дополнить объективными оценками. Их отсутствие может привести к занижению или завышению значений отдельных параметров программ, что, в свою очередь, станет триггером неэффективности их реализации. В качестве объективных оценок к мнению экспертов предлагается добавить данные по международному

опыту решения задач, поставленных в национальных проектах. Использование этого опыта также должно быть алгоритмизировано и формализовано, чтобы не допускать двояких толкований. Следует также внедрять современные методы сетевой экспертизы с существенным повышением ее статуса [28].

Еще одна проблема состоит в отсутствии четкого алгоритма определения приоритетности национальных проектов и связи между ними, что провоцирует отношение исполнителей к этим проектам как к независимым. Но, поскольку для их реализации требуются ограниченные ресурсы и реализация одних проектов невозможна без одновременной реализации других проектов, отсутствие алгоритма выстраивания связей между проектами и входящими в их состав программами может значительно затруднить реализацию проектов (с учетом их конкуренции за ресурсы) либо привести к реализации тех из них, приоритет которых не первостепенный, в ущерб реализации как раз первостепенных проектов.

Также, на наш взгляд, необходим, но не прописан более четкий алгоритм отбора адекватных исполнителей проектов, включая средних и малых наукоемких компаний, которым в настоящее время путь к победе на конкурсе за право участия в проекте, как правило, закрыт. А исполнители, не обладающие должным опытом работы и необходимым объемом ресурсов, служат одной из важнейших причин невыполнения проектов в срок и недостижения целевых показателей.

Еще одна серьезная проблема — монополизация рынка госзаказов через привлечение фиктивных, аффилированных фирм. Особенно важен алгоритм отбора в том случае, если к реализации проектов в качестве исполнителей будут привлечены частные компании. Последнее представляется необходимым, так как привлечение частных лиц позволит сформировать процесс реализации национальных проектов на конкурентных принципах, что повысит его эффективность. Необходимо более четко стандартизировать и конкретизировать требования к наличию у исполнителей опыта и ресурсов. Требования, позволяющие противостоять монополизации рынка распределения госзаказов в связи с реализацией национальных проектов. Необходимо формирование перечня критериев для отказа потенциальному исполнителю в участии в конкурсе по реализации проекта и соответствующего перечня критериев для принятия положительного решения относительно его участия в конкурсе.

Весомым залогом повышения эффективности реализации национальных проектов служит создание алгоритмов определения ответственности лиц, отвечающих за их реализацию. Ответственные лица (включая привлеченных подрядчиков) должны

четко понимать уровень ответственности и степень наказания за провал реализации отдельных программ и проектов, недостижение заявленных целевых показателей. Для этого необходим понятный, простой и строгий алгоритм применения инструментов позитивного и негативного стимулирования. Именно низкий уровень личной ответственности, на наш взгляд, служит одной из основных причин снижения эффективности государственного управления.

Авторы настоящей работы настаивают именно на алгоритмизации многих процессов, по сути, на создании комплекса формул, которыми они будут описываться, так как именно алгоритмизация позволит:

- более эффективно встроить процесс реализации проектов в концепцию цифровой экономики;
- минимизировать коррупционную составляющую, влияние которой на эффективность реализации национальных проектов чрезвычайно негативно.

Отдельного внимания заслуживает в определенной степени «ручное управление» некоторыми программами со стороны Президента Российской Федерации. Во многом его можно увидеть в ходе прямых линий Президента, а также его встреч с чиновниками разного уровня. Названия таких президентских полномочий разные: скрытые полномочия, подразумеваемые полномочия, указное право, поручительное право, резервные полномочия и др. [29]. Ручное управление приводит к снижению уровня инициативы на местах, со стороны регионов. Это может негативно сказываться на качестве контроля исполнения проектов.

Решение данной проблемы также во многом лежит в сфере алгоритмизации процессов реализации национальных проектов. Алгоритмы должны предусматривать обязательное участие регионов в национальных проектах путем разработки соответствующих предложений по региональному развитию. Алгоритмизация анализируемых процессов позволит сочетать принципы жесткости и гибкости при их реализации, что сделает реализацию более эффективной и устойчивой к внешним воздействиям.

Сочетание принципов жесткости и гибкости будет возможным в том случае, если, с одной стороны, на федеральном уровне будут заданы жесткие процедуры и нормативы, но, с другой стороны, в рамках этих процедур и нормативов региональные власти будут обладать достаточно большой свободой действий с жесткой персональной ответственностью за решение поставленных задач.

Рассмотрим направления создания системы контроля выполнения проектных решений, способной на практике реализовать описанные решения.

3. СИСТЕМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Первый этап разработки системы предварительного проектного контроля состоит в создании системы контроля на этапе формирования мероприятий в рамках реализации проектов. Прежде всего, необходимо четкое формирование перечня целей проектов (мероприятий) с качественной и количественной характеристикой каждого из них.

В качестве механизма определения связей между разноуровневыми показателями одного проекта целесообразно воспользоваться многоуровневым и взвешенным деревом целей. Для согласования показателей разных проектов возможно создание ситуационных координационных центров. Однако выгоды, получаемые от создания этих центров, должны превышать затраты на их создание.

Для определения приоритетности мероприятий проекта необходимо сформировать перечень показателей развития страны (отдельного региона) с их дальнейшим ранжированием по уровню приоритетности. Сформированный для конкретного мероприятия набор показателей с приоритетом достижения каждого из них — это основа определения приоритета самого мероприятия в проекте и дальнейшего ранжирования проектов. Чиновники и рядовые граждане могут иметь разные мнения по поводу приоритетности того или иного проекта (мероприятия). Отсюда следует, что двойственность мнений должна быть учтена при ранжировании показателей проекта по уровню приоритетности, для чего необходимо привлечь как профессиональных, так и непрофессиональных экспертов (возможно в рамках ситуационных центров). Это позволит обеспечить сочетание объективных и субъективных оценок. Экспертная деятельность в итоге снижает риски в принятии решений, эти решения становятся оригинальными и устойчивыми к внешнему воздействию, а цели обоснованными [30].

В рамках настоящей работы ограничимся тремя порядками показателей. Первый порядок — это показатели социально-экономического развития региона, второй порядок — показатели направлений развития, третий порядок — показатели, достижение которых необходимо для осуществления конкретного направления развития. Набор показателей третьего порядка должен быть строго ограничен для того чтобы избежать излишней аморфности и громоздкости системы контроля. Введем, в качестве примера, для третьего порядка набор из пяти показателей, что позволит оценивать их приоритетность по пятибалльной шкале. Также в рамках каждого уровня ограничимся порядком целей, равным пяти. Тогда алгоритм оценки приоритетности показателей будет следующим.



Шаг 1. Для каждого показателя по пятибалльной шкале эксперты по определенной методике выставляют оценку его приоритетности, определяют требуемое значение показателя и срок его получения. При этом методика может допускать формирование, например, двух наборов оценок: профессиональными и непрофессиональными экспертами.

Шаг 2. Выбирается иностранный регион как эталон для сравнения с ним значений показателей проекта развития отечественного региона путем расчета отклонений этих значений. По шкале приоритетности показатель с наибольшим отрицательным отклонением получает 5 баллов, показатель со вторым по объему отрицательным отклонением — 4 балла и т. д. Если же все отклонения положительны, возникает вопрос о целесообразности выбора данного иностранного региона для сравнения. Если выбор все-таки целесообразен, 5 баллов по шкале приоритетности получит показатель с наименьшим положительным отклонением.

На основе размера отклонения и существующего международного опыта преодоления подобных отклонений, профессиональные эксперты определяют реалистичный срок C_{Σ} ликвидации разрыва P между значениями показателей отечественного и иностранного регионов. Зная срок реализации проекта C_{Σ} , можно определить необходимый размер изменения показателя по формуле $\Delta P_{\Sigma} = PC_{\Sigma}/C_{\Sigma}$.

Итог: для каждого показателя определены три оценки значимости. На основе мнений профессиональных и непрофессиональных экспертов и на основе мирового опыта.

Шаг 3. Три полученные оценки показателя необходимо свести к одному значению: $O_{\text{общ}} = \alpha_{\text{пэ}} O_{\text{пэ}} + \alpha_{\text{нпэ}} O_{\text{нпэ}} + \alpha_{\text{м}} O_{\text{м}}$, где $O_{\text{общ}}$ — общая оценка показателя; $O_{\text{пэ}}$, $O_{\text{нпэ}}$ и $O_{\text{м}}$ — оценки профессиональных и непрофессиональных экспертов, оценка с учетом международного опыта; через α с соответствующими индексами обозначены веса этих оценок.

Описанная процедура проводится для каждого показателя каждого порядка. В результате будет получена оценка приоритетности каждого показателя $O_{\text{п}}$.

Предложенный алгоритм неполный, так как не учитывает влияния приоритетности показателя вышестоящего порядка на приоритетность соответствующего показателя нижестоящего порядка. Для учета этого влияния можно корректировать балльную оценку показателей. Если приоритетность показателя вышестоящего порядка равна пяти, предлагается добавить каждому из связанных с ней показателей последующего порядка, например, 0,5 балла. При приоритетности показателя

предыдущего порядка, равного 4, предлагается добавлять показателям последующего порядка 0,4 балла и т. д.: 3 — 0,3; 2 — 0,2; 1 — 0,1. Для сравнительной оценки важности показателей целесообразно воспользоваться методом анализа иерархий [31].

В итоге получаем ранжированный перечень показателей по мероприятиям (проектам) с определенными для каждого из них значениями и сроками их достижения. Предполагается, что все направления проекта второго порядка обладают одинаковым приоритетом. Если приоритеты разные, то для их определения нужно воспользоваться описанным алгоритмом.

После определения сроков, значений и приоритета показателей следует подкрепить эти показатели ресурсным обеспечением. Для каждого показателя и, как следствие, проекта (мероприятия) необходимо сформировать два набора данных: объем необходимых ресурсов для каждого i -го вида в натуральном $P_i^{\text{нат}}$ и денежном $P_i^{\text{фин}}$ выражении. Расчет этих данных также должен основываться на комбинации объективных и субъективных оценок. Полученные оценки объемов ресурсов P_i необходимо проверить на объективность. Для этого их необходимо сравнить с эталонными значениями $P_{\text{эт}}$, расчет которых предлагается производить по формуле $P_{\text{эт}} = \beta_{\text{пэ}} P_{\text{пэ}} + \beta_{\text{м}} P_{\text{м}}$, где $P_{\text{пэ}}$ и $P_{\text{м}}$ — оценка профессиональных экспертов и оценка согласно международному опыту, $\beta_{\text{пэ}}$ и $\beta_{\text{м}}$ — соответствующие веса.

Необходимо учесть затраты ресурсов, инвестиции в развитие экономики будут порождать мультипликативные эффекты, в результате которых может наблюдаться инфляция или перехват ресурсов у целенаправленно развиваемых отраслей и регионов прочими отраслями и регионами, импульс к развитию экономики которых дали именно мультипликативные эффекты. Подробнее необходимость и методы учета мультипликативных эффектов при принятии стратегических управленческих решений рассмотрены в работах [32, 33].

Расчетные значения необходимых объемов ресурсов P_i сравниваются с полученными эталонными значениями $P_{\text{эт}}$. Равенство $P_i = P_{\text{эт}}$ случайно, тем не менее, если оно наблюдается, анализ на данном этапе прекращается, необходимо перейти к следующему этапу — оценке наличия необходимых ресурсов (описан далее).

Если $P_i < P_{\text{эт}}$, то рассчитанные объемы ресурсов меньше их эталонных оценок — это положительный факт. Однако, необходимо определить причины возникновения положительных отклонений, так как они могут быть следствием ошибок при расчете эталонных оценок. Если это так — то оп-

ределить эксперта, по вине которого возникла ошибка, после чего поставить вопрос о целесообразности дальнейшего пребывания данного эксперта в экспертной группе.

Если $P_i > P_{\text{эт}}$, то рассчитанный объем необходимых ресурсов превышает эталонный объем — это негативный факт. Необходимо определить причины отклонений и направления сокращения рассчитанного объема ресурсов без ухудшения качественных и количественных характеристик показателей, планируемых к получению.

Причины отклонений могут заключаться и в занижении оценок $P_{\text{эт}}$ отдельными экспертами, что также ставит вопрос об изменении состава экспертной группы.

Результатом перечисленных мероприятий станет формирование для каждого показателя проекта (мероприятия, входящего в состав проекта) эталонных оценок

$$P_i(O_{\text{п}}, C_i, \Delta P_i, P_i^{\text{нат}}, P_i^{\text{фин}}), \quad i = \overline{1, 5},$$

где $O_{\text{п}}$ — оценка приоритетности проекта (мероприятия); C_i — срок реализации проекта (мероприятия); ΔP_i — результат реализации проекта (мероприятия); P_i — объем необходимых ресурсов.

Таким образом, проектное задание с эталонными характеристиками разработано, первый этап создания системы предварительного проектного контроля завершен.

Второй этап — необходимо определить, возможно ли выполнение проектного задания? Реальность выполнения задания зависит от того, насколько имеющиеся в наличии объемы ресурсов $P_{\text{факт}}$ соответствуют необходимым для выполнения задания P_i . В данном случае технологии рассматриваются как один из видов ресурсов — интеллектуальный ресурс.

Если $P_i \leq P_{\text{факт}}$ — процесс реализации проекта (мероприятия) обеспечен требуемым объемом ресурсов. Если $P_i > P_{\text{факт}}$, то существуют два варианта решения.

Вариант 1. Разработка специальных программ, направленных на увеличение объема дефицитных ресурсов. В рамках соблюдения принципа унификации, эти программы разрабатываются согласно описанному алгоритму. Результат: $P_i \leq P_{\text{факт}}$.

Вариант 2. Если проблема дефицита ресурсов не может быть решена в приемлемый период времени с приемлемыми показателями эффективности, дефицитные ресурсы распределяются на основе приоритетности проектов и входящих в них мероприятий. Наиболее приоритетные проекты (мероприятия) получают эти ресурсы в первую

очередь. Проектные показатели не будут достигнуты полностью, от выполнения ряда наименее приоритетных мероприятий необходимо отказаться вследствие нехватки ресурсов. Возможно изменение проектов.

4. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ПОДГОТОВКИ К РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА

Следует контролировать процесс проведения конкурса на выполнение работ в рамках проекта (мероприятия), обоснованность привлечения к выполнению работ на тех или иных этапах конкретных подрядчиков и субподрядчиков. Лиц, размещающих заказы в рамках осуществления проектов, нужно мотивировать к качественному выполнению работ. В этих целях предлагаются интегрированные балльные оценки работы этих лиц, значения которых будут влиять на размер премии и продление контракта с каждым из них.

В рамках контроля сроков и правильности процедур размещения заказа балльную оценку предлагается рассчитывать по формуле

$$B_{\text{разм}} = 1 - \gamma_{\text{ср}} K_{\text{ср}}^{\text{н}} / K_3 \gamma_{\text{оф}} K_{\text{оф}}^{\text{н}} / K_3, \quad (1)$$

где $B_{\text{разм}}$ — сумма баллов за размещение заказов в анализируемом периоде времени; K_3 — число размещенных заказов в анализируемый период времени; $K_{\text{ср}}^{\text{н}}$ — число заказов, размещенных с нарушениями по срокам размещения; $K_{\text{оф}}^{\text{н}}$ — число заказов, размещенных с нарушениями по оформлению; $\gamma_{\text{ср}}$ и $\gamma_{\text{оф}}$ — веса оценок важности соблюдения сроков оформления и важности соблюдения процедур оформления заказов.

Сумма весов $\gamma_{\text{ср}}$ и $\gamma_{\text{оф}}$ должна равняться единице. Предлагаются значения: $\gamma_{\text{ср}} = 0,4$; $\gamma_{\text{оф}} = 0,6$.

Заказы должны размещаться на конкурсной основе. Обеспечить конкуренцию лиц, размещающих заказ, можно также путем применения балльного показателя:

$$B_{\text{конк}} = (K_3 - K_{31}) / K_3, \quad (2)$$

где $B_{\text{конк}}$ — сумма баллов, полученная за размещение заказов в условиях конкуренции; K_{31} — число заказов в конкурсе, на размещение которых принимало участие менее трех участников. Максимальное значение $B_{\text{конк}}$ равно единице, минимальное — нулю.

Несколько компаний, участвующих в конкурсе, но принадлежащих одному владельцу (непосредственно или через цепочку посредников), рассматриваются как одна компания.



Система контроля подготовки к реализации проекта должна включать в себя подсистему отбора исполнителей. Вначале эта подсистема должна отсеять тех потенциальных исполнителей, у которых нет опыта в выполнении подобных заказов. В том случае, если потенциальный исполнитель ранее участвовал в реализации проектов (отдельных мероприятий), то обязательным критерием его допуска к новому конкурсу служит успешное участие в предыдущем проекте.

Потенциальных исполнителей следует проверить на предмет наличия у них необходимого для успешного выполнения работ объема ресурсов (технологии, оборудование, персонал и др.), включая страховой резерв на случай возникновения непредвиденной ситуации. Если исполнитель планирует привлекать к выполнению субподрядчиков, информация об этом должна быть раскрыта исполнителем на этапе подачи заявки на участие в реализации проекта. Список субподрядчиков должен содержать обоснование их привлечения, а также информацию о наличии у каждого из них опыта выполнения подобных проектов и необходимого объема ресурсов. По каждому направлению и виду работ заказчик может установить максимальный процент этих работ, который подрядчик может отдать к исполнению субподрядчикам. При отсутствии необходимого объема ресурсов у потенциальных исполнителей, субподрядчиков, а также при превышении объема работ, выполняемого субподрядчиками конкретного исполнителя над установленным процентом, данный исполнитель исключается из дальнейшей конкурсной процедуры.

На *следующем этапе контроля* основное условие отбора исполнителей состоит в удовлетворении их заявок критериям:

— объем $\Pi_{\text{и}}^{\text{к}}$ количественных и качественных показателей по проекту (мероприятию), предложенный потенциальным исполнителем должен быть равен или превышать объем $\Pi_i^{\text{к}}$ аналогичных показателей, рассчитанных лицами, ответственными за контроль над реализацией проекта на этапе его формирования:

$$\Pi_{\text{и}}^{\text{к}} \geq \Pi_i^{\text{к}}; \quad (3)$$

— срок $\Pi_{\text{и}}^{\text{с}}$ выполнения работ по проекту (мероприятию), предложенный исполнителем, должен быть меньшим или равным расчетному $\Pi_i^{\text{с}}$:

$$\Pi_{\text{и}}^{\text{с}} \leq \Pi_i^{\text{с}}; \quad (4)$$

— объем $\Pi_{\text{и}}^{\text{д}}$ денежных средств, предложенный исполнителем, должен быть меньшим или равным расчетному $\Pi_i^{\text{д}}$:

$$\Pi_{\text{и}}^{\text{д}} \leq \Pi_i^{\text{д}}. \quad (5)$$

Если хотя бы один из этих критериев не выполняется данным потенциальным исполнителем, он исключается из дальнейшей конкурсной процедуры.

Следующий этап посвящен отбору конкретных исполнителей. Исполнитель получает заказ при последовательном выполнении условий:

$$\Pi_{\text{и}}^{\text{к}} = \max, \quad \Pi_{\text{и}}^{\text{д}} = \min, \quad \Pi_{\text{и}}^{\text{с}} = \min.$$

В конкурсе могут участвовать как частные, так и государственные компании. Структурная схема предложенного механизма контроля выполнения проекта на этапе отбора исполнителей представлена на рисунке.

Количественные и качественные показатели исполнителя, выигравшего конкурсный отбор, признаются целевыми. В качестве механизма контроля исполнителя предлагается применить систему бюджетирования. Бюджеты составляются лицом, ответственным за реализацию данного этапа проекта, и согласовываются с исполнителем.

Результат отбора по завершению двух рассмотренных этапов — перечень конкретных исполнителей с целевыми показателями по срокам, качеству и ресурсам для реализации проекта (мероприятия).

5. СИСТЕМА КОНТРОЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТА (ТЕКУЩИЙ КОНТРОЛЬ)

Данный этап предполагает контроль исполнителя заказа в рамках реализации проекта (отдельного мероприятия). Первоначально необходимо проконтролировать соблюдение сроков передачи контракта на подписание (B_1). Исполнитель получает балльную оценку.

Оценивается соблюдение обязательств исполнителя по каждому этапу реализации проекта в качественном и количественном выражении (B_2). Оценивается соответствие объемов расходов по статьям установленным лимитам (B_3). Этот показатель будет применяться как при оценке инициатора проекта, так и при оценке его исполнителя. Также оценивается соблюдение сроков по каждому этапу исполнения обязательств (B_4). В случае расторжения контракта исполнитель обязан провести все необходимые процедуры и оформить все необходимые документы. Своевременность этих процедур также оценивается (B_5). Полученные бал-

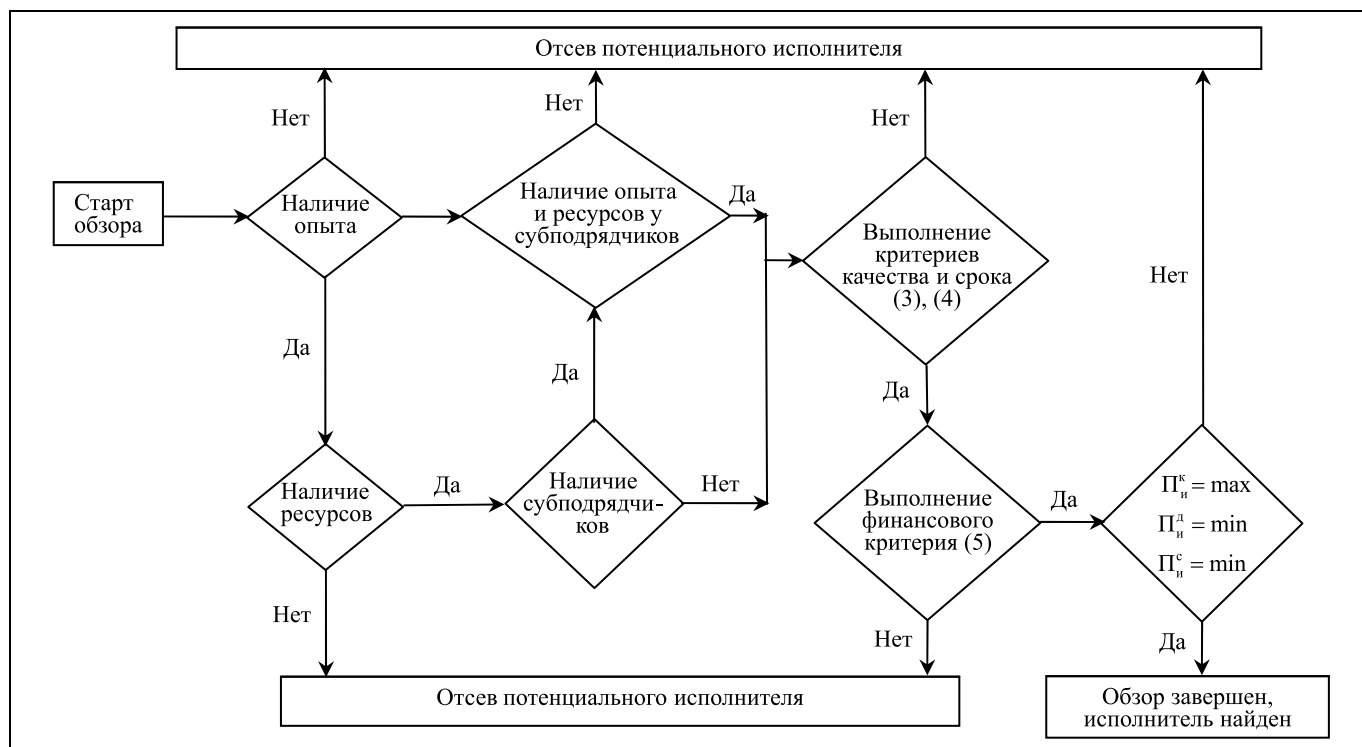


Схема контроля реализации проекта на этапе отбора исполнителей

лы следует интегрировать в единый показатель текущего контроля:

$$E_{\text{исп}} = \alpha_1 B_1 + \alpha_2 B_2 + \alpha_3 B_3 + \alpha_4 B_4 + \alpha_5 B_5,$$

где α_i — оценка значимости i -го показателя.

На основании полученных значений необходимо корректировать возможность участия конкретного исполнителя в конкурсах на получение заказов в рамках исполнения будущих проектов и разработать систему стимулов для исполнителей этапов реализации проекта.

Набор описанных инструментов позволяет получить весь спектр рычагов контроля по стратегическому, тактическому и оперативному управлению. Но система контроля нуждается в самоконтроле и настройке. Нужен *третий этап* контрольных процедур.

6. СИСТЕМА САМОКОНТРОЛЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ РАЗРАБОТЧИКОВ ПРОЕКТА

Часть показателей, необходимых для оценки, предложена выше — это показатели (1), (2), B_2 , B_3 и B_4 . Однако для полноты оценки эффективности действий разработчиков проекта этих показателей недостаточно.

Бюджетные средства могут экономиться не только в сравнении с изначально заложенной на

финансирование проекта суммой (оценка B_3), но и в сравнении со средней экономией по данному виду деятельности $\Theta_{\text{вд}}$:

$$B_{\text{вд}} = \Theta_{\text{общ}} / \Theta_{\text{вд}},$$

где $\Theta_{\text{общ}}$ — общая экономия, $\Theta_{\text{вд}}$ — средняя экономия размещения заказов.

Указанные параметры рассчитываются по формулам:

$$\Theta_{\text{вд}} = (P_{\text{спр}} - P_{\text{к}}) / P_{\text{к}} 100 \%, \quad (6)$$

где $P_{\text{спр}}$ — сумма средних цен предложений поставщиков по всем закупкам по конкретному виду деятельности, $P_{\text{к}}$ — сумма всех цен контрактов, заключенных по итогам размещения заказов по конкретному виду деятельности;

$$\Theta_{\text{общ}} = (P_{\text{пп}} - P_{\text{пк}}) / P_{\text{пк}} 100 \%,$$

где $P_{\text{пп}}$ — сумма средних значений цен, предложенных поставщиками в целом за период по заказчику (либо за период по заказчику по виду деятельности размещения), $P_{\text{пк}}$ — сумма предложений по ценам, по которым заключен контракт в целом за период по заказчику (либо за период по заказчику по виду деятельности размещения) [34].

Кроме этого, необходимо оценивать полноту и эффективность контроля над целевым использованием средств со стороны разработчика проекта



($B_{\text{цель}}$). Также необходимо оценить точность определения первоначальной цены контракта, предложенной конкретному исполнителю ($B_{\text{точ}}$). Оценка по данному направлению может быть произведена с помощью формулы (6) и формулы

$$\Delta P = P_{\text{нач}} - P_{\text{ср}},$$

где $P_{\text{нач}}$ — начальная цена контракта; $P_{\text{ср}}$ — средняя цена контрактов, предложенная участниками размещения заказов в рамках одного вида деятельности, причем

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum P_i,$$

где $\sum P_i$ — сумма цен, предложенных участниками размещения заказов, в рамках одного вида деятельности, $i = 1, \dots, n$; n — число участников размещения заказа.

Система разработанных оценок служит основой для расчета средневзвешенной оценки $E_{\text{разр}}$ эффективности работы разработчиков проекта (мероприятия):

$$E_{\text{разр}} = \alpha_p B_{\text{разм}} + \alpha_k B_{\text{конк}} + \alpha_{\text{обяз}} B_2 + \alpha_{\text{лим}} B_3 \alpha_{\text{срок}} B_4 \alpha_{\text{срок}} B_4 \alpha_{\text{эк}} B_{\text{эк}} + \alpha_{\text{цель}} B_{\text{цель}} + \alpha_{\text{точ}} B_{\text{точ}},$$

где α_i — вес i -й оценки в результативном показателе.

На основе набранных баллов предлагается создать систему мотивации разработчиков проекта. Кроме всего описанного, необходимо определить фактическое влияние реализации проекта на динамику ВВП (ВРП) и уровень инфляции. Рассчитывается фактическое значение мультипликативного эффекта от внедрения проекта. Полученное значение необходимо сравнить с запланированным для оценки правильности планирования объема мультипликатора инвестиций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предложенных алгоритмах реализации национальных проектов применен достаточно широкий спектр технологий целеуказания и контроля: от ранжированного дерева целей, экспертных оценок и бизнес-планирования до бюджетирования, связанного с системой мотивации участников процесса реализации проекта. Предложенные алгоритмы во многом основаны на комбинации трех видов оценок для получения оптимального результата. Это оценки профессиональных, непрофессиональных экспертов, а также оценки, основанные на мировом опыте реализации проектов, подобных разрабатываемому. Комбинация этих оценок с учетом весовых коэффициентов позволит получить наиболее обоснованные характеристики как

необходимости, так и самого процесса реализации проекта.

Предложенные механизмы позволят отсеять недобросовестных подрядчиков и субподрядчиков уже на стадии проведения конкурсных процедур по поиску исполнителей проекта. В свою очередь, это позволит минимизировать вероятность использования ресурсов, выделенных на реализацию проекта, нецелевым образом. Механизмы контроля, описанные в работе, позволят повысить эффективность системы проектного управления путем более эффективного использования ресурсов при одновременной минимизации возможности получения негативного результата, выражающегося в недостижении запланированных на стадии формирования проекта целей и значений показателей. Предложенный алгоритм является гибким и настраиваемым, что чрезвычайно важно в сложных, весьма переменчивых условиях современной экономики и социального развития общества

ЛИТЕРАТУРА

1. Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204 (ред. от 19.07.2018) «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» [Электронный ресурс]. — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_297432/ (дата обращения: 20.09.2018).
2. Социогуманитарные аспекты ситуационных центров развития / под ред. В.Е. Лепского, А.Н. Райкова. — М.: «Когито-Центр», 2017. — 416 с.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 15.10.2016 № 1050 «Об организации проектной деятельности в Правительстве Российской Федерации» (вместе с «Положением об организации проектной деятельности в Правительстве Российской Федерации»). — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_206009/ (дата обращения: 20.09.2018).
4. Кейнс Дж.М. Общая теория занятости, процента и денег. — М.: Гелиос АРВ, 1999. — 352 с.
5. Денисенко И.Ф. Принятие и исполнение государственных решений: учеб. пособие. — Ростов н/Д.: Аспект Пресс, 2018. — 140 с.
6. Аксенова О.В. Модели управления в России и на Западе: риски и перспективы развития // Россия реформирующаяся. — 2018. — № 16. — С. 348—372.
7. Заверский С.М., Киселева Е.С., Кононова В.Ю. и др. Стратегическое планирование развития экономики: мировой опыт и выводы для России // Вестник ИЭ РАН. — 2016. — № 2. — С. 22—40.
8. Управление проектами: справочник для профессионалов / под ред. А.В. Цветкова, В.Д. Шапиро. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Омега-Л, 2010. — 1276 с.
9. Мироненко Н.В., Леонова О.В., Балашов А.Н. и др. Проектное управление: проблемы и особенности внедрения в государственном секторе: научная монография. — Орел: Среднерусский институт управления — филиал РАНХиГС, 2017. — 207 с.
10. Харченко К.В. Проектное управление в государственных и муниципальных органах и учреждениях: учеб. пособие. — М.: Дело, 2018. — 161 с.
11. Лапыгин Ю.Н. Проектный подход к управлению // Ученые записки филиала РАНХиГС при Президенте Российской Федерации (г. Владимир). — 2018. — № 2 (26). — С. 34—43.

12. Балакина Г.Ф. Возможности применения проектного подхода в управлении регионом // Матер. 2-й междунар. науч.-практ. конф. «Региональная экономика: технологии, экономика, экология и инфраструктура». — Казань, 2017. — С. 32—37.
13. Ванюшкин А.С. Структурирование механизмов запуска проектной экономики в России // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. Экономика и управление. — 2017. — № 3 (69). — С. 39—51.
14. Указ Президента Российской Федерации от 19.07.2018 № 444 «Об упорядочении деятельности совещательных и консультативных органов при Президенте Российской Федерации» (вместе с «Положением о Совете при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и национальным проектам»). — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_302869/ (дата обращения: 20.09.2018).
15. Постановление Правительства Российской Федерации от 15.10.2016 г. № 1050 «Об организации проектной деятельности в Правительстве Российской Федерации». — URL: <http://static.government.ru/media/files/Tw3T8ZAAoctXgwOxAY15z72sYiL1aVTs.pdf> (дата обращения: 20.09.2018).
16. Приказ Минэкономразвития России от 16.09.2016 № 582 (ред. от 15.03.2017) «Об утверждении Методических указаний по разработке и реализации государственных программ Российской Федерации» (Зарегистрировано в Минюсте России 10.10.2016 № 43976). — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_205801/ (дата обращения: 20.09.2018).
17. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.08.2010 № 588 (ред. от 31.08.2018) «Об утверждении Порядка разработки, реализации и оценки эффективности государственных программ Российской Федерации». — URL: http://www.consultant.ru/document/Cons_doc_LAW_103481/ (дата обращения: 20.09.2018).
18. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.11.2010 № 1950-р (ред. от 23.02.2018) «Об утверждении перечня государственных программ Российской Федерации». — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_106979/ (дата обращения: 20.09.2018).
19. Методические рекомендации по оценке и иным контрольным мероприятиям реализации приоритетных проектов (программ) (утв. Аппаратом Правительства Российской Федерации 31.05.2017 № 3756п-П6). — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_256138/ (дата обращения: 20.09.2018).
20. Методические рекомендации по мониторингу приоритетных проектов (программ) (утв. Аппаратом Правительства Российской Федерации 01.12.2016 № 9163п-П6). — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220727/ (дата обращения: 20.09.2018).
21. Методические рекомендации по реализации и управлению изменениями приоритетных проектов (программ) (утв. Аппаратом Правительства Российской Федерации 15.02.2017 № 1078п-П6). — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_220728/ (дата обращения: 20.09.2018).
22. Методические рекомендации по подготовке сводного и рабочего планов приоритетного проекта (программы) (утв. Аппаратом Правительства Российской Федерации 18.11.2016 № 8695п-П6). — URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_255053/ (дата обращения: 20.09.2018).
23. ГОСТ Р 54870—2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Проектный менеджмент. Требования к управлению портфелем проектов (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2011 № 1583-ст). — URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=OTN;n=22#04643976511058061> (дата обращения: 20.09.2018).
24. ГОСТ Р 54871—2011. Национальный стандарт Российской Федерации. Проектный менеджмент. Требования к управлению программой (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 22.12.2011 № 1584-ст). — URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=OTN;n=23#07340324754357841> (дата обращения: 20.09.2018).
25. ГОСТ Р 52807—2007. Национальный стандарт Российской Федерации. Руководство по оценке компетентности менеджеров проектов (принят и введен в действие Приказом Росстандарта от 27.12.2007 № 423-ст). — URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=OTN;n=9179#030033470839663723> (дата обращения: 20.09.2018).
26. Шубина Д. СП: Минздрав неэффективно управляет программой «развитие здравоохранения» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://vademec.ru/news/2017/09/20/sp-minzdrav-neeffectivno-upravlyaet-programmoj-razvitiye-zdravookhraneniya/> (дата обращения: 20.09.2018).
27. Смирнов В. В Минобре объяснили неэффективность госпрограмм по развитию науки. — URL: <https://indicator.ru/news/2017/08/04/minobr-nauki-razvitiye-nauki-i-obrazovaniya/> (дата обращения: 20.09.2018).
28. Gubanov D., Korgin N., Novikov D., Raikov A. E-Expertise: Modern Collective Intelligence. — Springer, 2014. — Series: Studies in Computational Intelligence. — Vol. 558, XVIII. — 112 p.
29. Комарова В.В. Скрытые полномочия Президента России: вопросы теории и практики // Вестник университета им. О.Е. Кутафина. — 2018. — № 6. — С. 15—23.
30. Райков А.Н. «Экспертотократия» как инструмент лоббирования // Тр. XV Байкальской всеросс. конф. «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Ч. 3. — Иркутск, 2010. — С. 121—122.
31. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
32. Еремин В.В. Влияние ценового фактора на динамику взаимодействия мультипликатора и акселератора инвестиций // Экономика. Предпринимательство. Окружающая среда. — 2016. — № 2 (66). — С. 8—14.
33. Еремин В.В. Математический анализ мультипликатора автономных расходов в статике и динамике. Монография. — Уфа: Азтерна, 2015. — 172 с.
34. Аристархова М.К. Методика оценки эффективности исполнения государственного заказа // Известия Уральского государственного экономического университета. — 2017. — № 1 (69). — С. 47—62.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.Н. Бурковым.

Райков Александр Николаевич — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва; ст. науч. сотрудник, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, ✉ alexander.n.raikov@gmail.com,

Бауэр Владимир Петрович — д-р экон. наук, директор Центра стратегического планирования и прогнозирования Института экономической политики и проблем экономической безопасности Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, ✉ bvp09@mail.ru; sidorov@mail.ru,

Еремин Владимир Владимирович — канд. экон. наук, вед. науч. сотрудник, Центр мониторинга и оценки экономической безопасности Института экономической политики и проблем экономической безопасности Финансового университета при Правительстве Российской Федерации, г. Москва, ✉ villy.eremin@gmail.com.

*Поступила в редакцию 10.10.2018.
Принята к публикации 12.12.2018.*

МЕТОДОЛОГИЯ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ АКТИВНЫХ СИСТЕМ¹

Г.А. Угольников

Представлена концепция управления устойчивым развитием произвольных сложных динамических систем с участием людей (активных систем). Отмечено, что устойчивое развитие означает выполнение требований гомеостаза и системной согласованности. В основу математической формализации задач управления устойчивым развитием активных систем положен аппарат дифференциальных игр в нормальной форме, форме характеристической функции и с иерархической структурой. Даны постановки задач управления устойчивым развитием для активных систем с независимым поведением агентов, их кооперацией и иерархическим управлением. Рассмотрены частные классы моделей стимулирования и моделей сочетания общественных и частных интересов, дан обзор ряда других прикладных задач, решенных в рамках предлагаемой концепции. Приведен иллюстративный пример. Основное внимание уделено методологическим аспектам развиваемой концепции.

Ключевые слова: активные системы, дифференциальные игры, иерархическое управление, кооперация, устойчивое развитие.

ВВЕДЕНИЕ

Понятие активной системы предложено В.Н. Бурковым, и его дальнейшие исследования совместно с коллегами и учениками привели к созданию теории активных систем [1—5]. Новый импульс эти исследования получили в теории управления организационными системами, развиваемой Д.А. Новиковым и его соавторами [6, 7]. Близкие подходы применяются в российской научной литературе в информационной теории иерархических систем [8, 9], а в зарубежной — в рамках теории контрактов и дизайна механизмов [10, 11].

Концепция устойчивого развития первоначально возникла при анализе воздействия человека на окружающую природную среду и изложена в огромном количестве научных и политических публикаций, например, [12—16]. В основе этой концепции лежит понятие гомеостаза, т. е. выполнения определенных требований к состоянию эколого-экономических систем на протяжении длительного времени. Математическая формализация

этого понятия нашла наиболее развитое отражение в теории живучести Ж.-П. Обена [17] и работах его последователей [18, 19].

Авторская концепция управления устойчивым развитием активных систем [20—22] расширяет предметную область на произвольные сложные системы с участием людей и дополняет условие гомеостаза требованием учета интересов активных агентов, которые должны обеспечивать гомеостаз (системная согласованность). Тем самым, развиваемая теория синтезирует два указанных направления исследований. В качестве математического аппарата применяется аппарат дифференциальных игр в нормальной форме [23], в форме характеристической функции [24] и с иерархической структурой [9, 25], а также лежащие в их основе задачи оптимального управления [26, 27].

В § 1 приведены динамические задачи управления устойчивым развитием активных систем в различных постановках: независимое поведение равноправных агентов, их кооперация и метод убеждения, иерархическое управление посредством принуждения и побуждения. Здесь основное внимание уделяется методологии исследования. В § 2 рассматриваются динамические модели стимулирования как частный случай задач управления ус-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-19-01038.

тойчивым развитием, дается обобщение известных результатов для статических постановок в динамической версии. В § 3 предложена постановка динамической задачи сочетания общественных и частных интересов (СОЧИ-модели). В § 4 дан обзор приложений разрабатываемой теории управления устойчивым развитием активных систем к ряду предметных областей. В § 5 рассмотрен иллюстративный пример. Итоги обсуждаются в Заключение.

1. КОНЦЕПЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ РАЗВИТИЕМ АКТИВНЫХ СИСТЕМ

Под *активной системой* понимается структурированная совокупность активных элементов. Примерами активных систем служат организационные, экономические, социальные и иные сложные динамические системы с участием людей.

Активный элемент (агент) — субъект, имеющий собственные интересы (цели) и возможности их достижения. Активный агент способен к стратегическому поведению, т. е. выбору действий, направленных на достижение цели, что может быть связано с сознательным искажением передаваемой другим активным агентам информации (манипуляцией). Примеры активных агентов с учетом принципа системной относительности: предприниматель, фирма, избиратель, партия, муниципальное образование, страна, член семьи и др.

Активные агенты действуют в соответствии с собственными интересами. Наряду с этим, существуют цели и требования, важные для активной системы в целом, но совсем не обязательно совпадающие с интересами отдельных агентов. Эти условия назовем *гомеостазом* активной системы. Например, расположенное на берегу водного объекта предприятие заинтересовано в максимизации прибыли, а не в соблюдении экологических требований к состоянию этого объекта. Сотрудник организации в большей степени заинтересован в повышении зарплаты и экономии усилий, чем в достижении долгосрочных целей развития этой организации. Поэтому обычно возникает *Центр (принципал, ведущий)* — выделенный активный элемент, выражающий интересы активной системы в целом и отвечающий за выполнение условий гомеостаза. Примеры: правительство (парламент, президент) страны, руководство организации, администрация региона, партийный лидер, глава семьи и др.

Анализ проблемы управления устойчивым развитием активных систем позволяет сформулировать следующие эмпирические принципы.

- *Принцип экономической рациональности*: интересы каждого активного агента, в том числе Центра, целиком и полностью характеризуются

стремлением к максимизации выигрыша с учетом имеющихся ограничений. Отметим, что ряд авторов (Д. Канеман и А. Тверски, Г. Саймон и др.) развивают более общую концепцию ограниченной рациональности, учитывающую неполноту информации принимающего решения субъекта и ряд других факторов.

- *Принцип ответственности Центра*: главная цель Центра заключается в обеспечении условий гомеостаза, при этом он может иметь дополнительные частные интересы.
- *Принцип необходимости управления*: в общем случае интересы отдельных агентов не совпадают с требованиями гомеостаза.

Основная трудность обеспечения гомеостаза состоит именно в том, что активные агенты далеко не всегда заинтересованы в выполнении его условий, в силу чего формулирование требований гомеостаза в официальных документах по устойчивому развитию остается простой декларацией. Поэтому устойчивое развитие наряду с условиями гомеостаза обязательно должно предполагать учет интересов обеспечивающих его активных агентов (системную согласованность). Совместное выполнение условий гомеостаза и системной согласованности и означает *устойчивое развитие* активной системы.

Идеальным способом достижения устойчивого развития выступает *убеждение* — добровольная и осознанная интериоризация требований гомеостаза всеми агентами. Примерами убеждения могут служить экологическое сознание, социально ответственный бизнес, благотворительность, волонтерство, разоружение и др.

Однако на практике убеждение пока остается в основном делом будущего, поэтому приходится применять иерархическое управление Центра путем принуждения и/или побуждения. *Принуждение* включает в себя административно-законодательные механизмы управления, явно ограничивающие множества возможных действий агентов так, чтобы они не могли нарушить гомеостаз. *Побуждение* состоит в использовании экономических механизмов, делающие желательные для Центра гомеостатические действия более выгодными для агентов.

Рассмотрим постановки задач управления устойчивым развитием с применением методов принуждения, побуждения и убеждения для активных систем различной структуры.

1.1. Независимое поведение равноправных агентов

В исходной модели множество независимых агентов одновременно и независимо друг от друга воздействуют на некоторый динамический объект в своих интересах. Вместе с тем, существуют объективные требования (условия гомеостаза), кото-



рым должно удовлетворять состояние объекта в смысле активной системы в целом. Такая ситуация формализуется как дифференциальная игра нескольких лиц в нормальной форме вида

$$J_i(u(\cdot)) = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} g_i(x(t), u(t), t) dt \rightarrow \max; \quad (1)$$

$$u_i(t) \in U_i, \quad i \in N; \quad (2)$$

$$\dot{x} = f(x(t), u(t), t), \quad x(0) = x_0. \quad (3)$$

Здесь $N = \{1, \dots, n\}$ — множество активных агентов; g_i и J_i — мгновенная функция и интегральный функционал выигрыша агента $i \in N$; $u_i(t)$ — управляющее действие (управление) агента $i \in N$ в момент t ; U_i — множество допустимых управлений агента $i \in N$; $u(t) = (u_1(t), \dots, u_n(t))$ — набор управляющих воздействий агентов; $U = U_1 \times \dots \times U_n$; $x(t)$ — значение переменной состояния в момент t ; x_0 — начальное состояние; f — заданная функция, определяющая изменение состояния во времени; $\rho \in [0, 1]$ — коэффициент дисконтирования. В общем случае фазовая переменная и управление могут быть векторными величинами. Бесконечный период времени более адекватен для концепции устойчивого развития, хотя возможны и постановки при $T < \infty$. Предполагаются выполненными условия [8]: множества U_i компактны в соответствующих векторных пространствах; вектор-функция f непрерывна по t и непрерывно дифференцируема по остальным параметрам; существует константа $\kappa > 0$ такая, что при любых $x, t \geq 0, u \in U$ имеет место неравенство $\|f(x, u, t)\| \leq \kappa(1 + \|x\|)$; функции g_i непрерывны по всем аргументам; классам допустимых позиционных стратегий принадлежат кусочно-непрерывные по t и гладкие по x при всех $t \geq 0$ функции, удовлетворяющие ограничению (2).

Условие гомеостаза можно записать в виде

$$x(t) \in X^* \subseteq R^n, \quad t \in [0, \infty). \quad (4)$$

Подчеркнем, что в исходной постановке условие (4) внешнее для множества агентов, поэтому изначально модель нельзя рассматривать как дифференциальную игру (1)–(3) с дополнительными фазовыми ограничениями (4).

Будем считать решением игры (1)–(3) множество равновесий Нэша NE , считая $NE \neq \emptyset$ (иначе нечего обсуждать). В частности, $NE \neq \emptyset$, если множества U_i выпуклы и компактны, а функции $g_i(u_i, u_{-i})$ вогнуты по u_i на множествах U_i для всех $u_{-i} \in U_{-i}$, $i \in N$, где $u_{-i} = (u_1, \dots, u_{i-1}, u_{i+1}, \dots, u_n)$, $U_{-i} = U_1 \times \dots \times U_{i-1} \times U_{i+1} \times \dots \times U_n$.

Обозначим $U^* = \{u \in U: \forall t x(t) \in X^*\}$ — множество управлений, обеспечивающих гомеостаз, и вновь предположим, что $U^* \neq \emptyset$, иначе рассмотрение теряет смысл.

Если $U_{DG} = NE \cap U^* \neq \emptyset$, то задача управления устойчивым развитием (1)–(4) имеет решение. Управления $u \in U_{DG}$ обеспечивают гомеостаз, при этом интересы агентов также учитываются через равновесие Нэша в их игре.

Для более детального анализа проблемы согласования интересов введем функционал общественного благосостояния

$$J(u(\cdot)) = \sum_{i \in N} J_i(u(\cdot)).$$

Тогда, если выполняется условие

$$\forall u^{NE} \in NE \setminus U_{DG} \exists u \in U_{DG}: J(u) \geq J(u^{NE}), \quad (5)$$

то требования гомеостаза (4) полностью совместимы с общественным благосостоянием. Если же верно противоположное утверждение

$$\exists u^{NE} \in NE \setminus U_{DG} \forall u \in U_{DG}: J(u) < J(u^{NE}), \quad (6)$$

то требования гомеостаза не полностью совместимы с общественным благосостоянием. Далее, если справедливо утверждение

$$\forall i \in N \forall u^{NE} \in NE \setminus U_{DG} \exists u \in U_{DG}: J_i(u) \geq J_i(u^{NE}), \quad (7)$$

то требования гомеостаза полностью совместимы с частными интересами всех агентов, а если верно противоположное утверждение

$$\exists i \in N \exists u^{NE} \in NE \setminus U_{DG} \forall u \in U_{DG}: J_i(u) < J_i(u^{NE}), \quad (8)$$

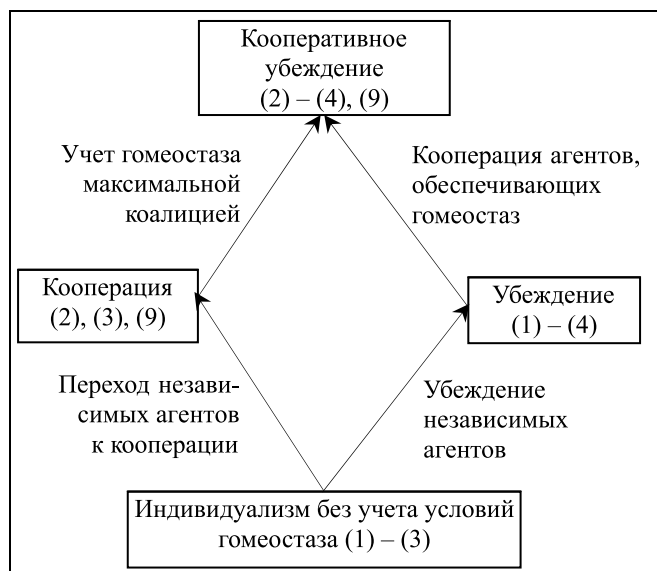
то требования гомеостаза несовместимы с частными интересами некоторых агентов. Очевидно, что (7) $\rightarrow$ (5), (6) $\rightarrow$ (8).

Если $U_{DG} = NE \cap U^* = \emptyset$, то задача управления устойчивым развитием (1)–(4) в исходной постановке неразрешима.

Если $U_{DG} \neq \emptyset$, но справедливо утверждение (6) или хотя бы утверждение (8), то задача разрешима, но общественное благосостояние в целом или, по крайней мере, интересы некоторых агентов при выполнении условий гомеостаза пострадают. В этих случаях возможны два способа изменения постановки задачи, рассмотренные в п. 1.2 и 1.3.

1.2. Кооперация агентов и метод убеждения

Независимые агенты могут вступить в кооперацию, образовать коалицию и совместно максимизировать суммарный функционал выигрыша (общественное благосостояние) по всем управляющим переменным. Тогда вместо дифференци-



Пути модификации исходной модели управления устойчивым развитием

альной игры в нормальной форме (1)–(3) возникает задача оптимального управления

$$J(u(\cdot)) \rightarrow \max \quad (9)$$

с ограничениями (2), (3).

Введем множество $\bar{U} = \text{Arg max}_{u(\cdot) \in U} J(u(\cdot))$. Если $U_{OC} = U^* \cap \bar{U} \neq \emptyset$, то задача управления устойчивым развитием активных систем в кооперативной постановке имеет решение. Заметим, что здесь всегда $U_{OC} \neq \emptyset \Rightarrow \forall \bar{u} \in \bar{U} \setminus U_{OC} \exists u \in U_{OC}: J(u) = J(\bar{u})$, т. е. условие $U_{OC} \neq \emptyset$ обеспечивает согласованность гомеостаза с общественным благосостоянием.

Метод убеждения заключается в том, что все агенты добровольно и осознанно соглашаются обеспечивать условие гомеостаза (4). В этом и только в этом случае задача управления устойчивым развитием активных систем при независимых агентах описывается дифференциальной игрой в нормальной форме с фазовыми ограничениями (1)–(4).

Наконец, возможен комплексный вариант, при котором агенты кооперируются и соглашаются обеспечивать условие гомеостаза (4). Тогда для максимальной коалиции агентов возникает задача оптимального управления (9) с фазовыми ограничениями (2)–(4). Указанные пути модификации исходной модели представлены на рисунке.

При кооперации агентов возникает дополнительная задача распределения выигрыша максимальной коалиции между игроками. Она решается

путем построения дифференциальной игры в форме характеристической функции на основе исходной дифференциальной игры, выбора некоторого кооперативного принципа оптимальности (С-ядро, вектор Шепли и др.) и обеспечения динамической устойчивости этого решения с помощью предложенной Л.А. Петросяном процедуры распределения дележа [24].

1.3. Иерархическое управление для достижения устойчивого развития

Если задача управления в исходной постановке неразрешима, а метод убеждения на практике неприменим, то вводится Центр, основная цель которого — обеспечение гомеостаза посредством воздействия на множества допустимых управлений агентов (принуждение) или их функционалы выигрыша (побуждение). В этом случае возникает иерархическая дифференциальная игра

$$J_0(p(\cdot), q(\cdot), u(\cdot)) = \int_0^\infty e^{-\rho t} g_0(x(t), p(t), q(t), u(t), t) dt \rightarrow \max, \quad (10)$$

$$p(t) \in P, \quad q(t) \in Q; \quad J_i(p(\cdot), q(\cdot), u(\cdot)) =$$

$$\int_0^\infty e^{-\rho t} g_i(x(t), p_i(t), u(t), t) dt \rightarrow \max, \quad (12)$$

$$u_i(t) \in U_i(q_i(t)), \quad i \in N, \quad (13)$$

в силу ограничений (3) и (4). Здесь g_0 и J_0 — мгновенная функция и интегральный функционал выигрыша Центра; $p(t) = (p_1(t), \dots, p_n(t))$ — вектор управлений побуждения; $q(t) = (q_1(t), \dots, q_n(t))$ — вектор управлений принуждения. Важно, что в данном случае модель представляет собой дифференциальную игру с фазовыми ограничениями, поскольку выполнение условия гомеостаза (4) есть основная цель Центра. Отметим также, что теперь множество равновесий Нэша в игре агентов есть $NE(p, q)$, так как решения зависят от действий Центра. Предполагаются выполненными те же математические требования, что и для модели (1)–(3).

Введем множества управлений агентов:

$U^{\max} = \text{Arg max}_{p \in P, q \in Q} \max_{u \in NE(p, q)} J_0(p, q, u)$ — доставляющих глобальный максимум функционалу выигрыша Центра;

$U_{NE}^{\max} = \text{Arg max}_{p \in P, q \in Q} \max_{u \in NE(p, q)} J_0(p, q, u)$ — обеспечивающих согласование интересов агентов с интересами Центра без учета гомеостаза;

$U_{\max}^* = \text{Arg max}_{p \in P, q \in Q} \max_{u \in U^*} J_0(p, q, u)$ — обеспечивающих гомеостаз при учете интересов Центра, но не агентов;



$U_{NE}^*(p, q) = NE(p, q) \cap U^*$ — обеспечивающих гомеостаз при учете интересов агентов, но не Центра;

$U_{HDG}(p, q) = U_{NE}^{\max} \cap U_{\max}^* \cap U_{NE}^*(p, q)$ — обеспечивающих гомеостаз при полной системной согласованности интересов.

Если $\exists(p, q) \in P \times Q: U_{HDG} \neq \emptyset$, то задача управления устойчивым развитием (3), (4), (10)—(13) имеет решение в иерархической постановке. Непустота множеств $U_{\max}^*$, $U_{NE}^*(p, q)$ дает теоретическую возможность решения задачи, но на практике эта возможность сомнительна, поскольку не учитываются либо интересы агентов, либо интересы Центра.

Остановимся на некоторых моментах, связанных с описанной концепцией.

Методы решения задачи управления устойчивым развитием. К *аналитическим* методам решения дифференциальных игр относятся принцип максимума Понтрягина и применение уравнений Гамильтона — Якоби — Беллмана [23—27]. Эти методы позволяют найти решение игры (равновесие Нэша или Штакельберга) в явном виде, но в силу высокой сложности задачи они реально применимы лишь для ограниченных классов игр (например, линейных по состоянию, линейно-квадратических и т. п.). Для иерархических дифференциальных игр в работе [9] предложен метод нахождения ε -оптимальной гарантирующей стратегии Центра, основанный на применении поощрения агентов, когда они выбирают желательные для него стратегии, и наказания в противном случае, что обобщает известную теорему Гермейера для статической модели [8]. Однако этот метод требует дополнительной модификации для случая нескольких агентов с учетом требований гомеостаза, предложенной в работе [28]. В зарубежной литературе близкий подход связан с применением триггерных стратегий [23].

В общем случае для решения задачи управления устойчивым развитием по сравнению с аналитическими методами более эффективны *численные методы и имитационное моделирование*. В статье [29] рассматривается применение алгоритмов эволюционного моделирования для решения задач распределения ресурсов в организационных системах. Особенности предлагаемого подхода:

- явно описывается динамика ресурса в зависимости от управления Центра;

- Центр распределяет ресурс между агентами пропорционально их действиям, что побуждает агентов к выбору более напряженного плана;

- управление Центра не может меняться резко, что формализуется как липшицево свойство функции управления; представляется, что это предпо-

ложение выполняется для большинства реальных организационно-экономических систем;

- на основе предыдущей гипотезы разрабатывается генетический алгоритм нахождения оптимальной стратегии Центра в иерархической дифференциальной игре.

В работе [30] описан метод качественно репрезентативных сценариев (КРС) имитационного моделирования, который состоит в следующем. Обозначим в модели (10)—(13) через $v(t)$ вектор управляющих воздействий Центра (принуждения $q(t)$ или побуждения $p(t)$). Пусть $\Omega = V_1 \times \dots \times V_n \times U_1 \times \dots \times U_n$ — множество исходов игры. Метод КРС исходит из предположения $U_i = U_i^{QRS}$, $V_i = V_i^{QRS}$ $\forall i = 1, 2, \dots, n$, где множества U_i^{QRS} и V_i^{QRS} содержат качественно репрезентативные стратегии агента i и Центра по отношению к агенту i соответственно. Предположим дополнительно, что мощность множеств V_i^{QRS} и U_i^{QRS} , $i = 1, 2, \dots, n$, достаточно мала, так что они содержат по K элементов, т. е. $|U_i^{QRS}| = |V_i^{QRS}| = K$. Тогда $V_1^{QRS} \times \dots \times V_n^{QRS} \times U_1^{QRS} \times \dots \times U_n^{QRS} = QRS$ есть множество КРС данной игры, которое включает в себя $m = |QRS| = \prod_{i=1}^n |V_i^{QRS}| |U_i^{QRS}| = K^{2n}$ элементов. Каждый репрезентативный сценарий игры $(v, u)^{(k)} \in QRS$, $k = 1, 2, \dots, m$, имеет вид:

$$(v, u)^{(k)} = (v_1^{(k)}, v_2^{(k)}, \dots, v_n^{(k)}, u_1^{(k)}, u_2^{(k)}, \dots, u_n^{(k)});$$

$$v_i^{(k)} \in V_i^{QRS}; \quad u_i^{(k)} \in U_i^{QRS}; \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Определение. Множество $QRS = \{(v, u)^{(1)}, (v, u)^{(2)}, \dots, (v, u)^{(m)}\}$ называется *множеством КРС иерархической дифференциальной игры с точностью Δ* , если:

(а) для любых двух элементов этого множества $(v, u)^{(i)}, (v, u)^{(j)} \in QRS$ справедливо

$$|J_0^{(i)} - J_0^{(j)}| / J_0^{\max} > \Delta;$$

(б) для любого другого элемента $(v, u)^{(l)} \notin QRS$ найдется элемент $(v, u)^{(j)} \in QRS$ такой, что $|J_0^{(l)} - J_0^{(j)}| / J_0^{\max} \leq \Delta$. ♦

Здесь $J_0^{(i)}, J_0^{(j)}, J_0^{(l)}$ — соответствующие выигрыши Центра (в смысле выражения (10)); $J_0^{(s)} = J_0(v_1^{(s)}, v_2^{(s)}, \dots, v_n^{(s)}, u_1^{(s)}, u_2^{(s)}, \dots, u_n^{(s)})$, $s = i, j, l$; $J_0^{\max}$ — глобальный максимум функционала выиг-

рыша Центра (10) на множестве КРС игры по $2n$ функциям $v_i \in V_i^{QRS}$; $u_i \in U_i^{QRS}$; $i = 1, 2, \dots, n$; $\Delta > 0$ — константа, определяющая точность. Таким образом, КРС ведут к существенному различию в выигрышах Центра, а различие между одним из репрезентативных и любым другим сценарием в этом смысле несущественно. Метод КРС эвристический, выбирать сценарии следует, исходя из специфики конкретной задачи таким образом, чтобы выполнялось приведенное определение.

Информационные регламенты дифференциальных игр определяются следующими парами классификационных признаков:

— программные стратегии $v(t) = \varphi(t)$ или позиционные стратегии $v(t) = \varphi(t, x(t))$;

— стратегии без обратной связи по управлению $v(t) = \varphi(t)$ или с таковой: $v(t) = \varphi(t, u(t))$. В первом случае возникают игры Гермейера типа Γ_{1t} или Γ_{1x} (игры Штакельберга), во втором — игры Гермейера типа Γ_{2t} или Γ_{2x} (обратные игры Штакельберга) [9, 31];

— принуждение $v(t) = q(t)$ или побуждение $v(t) = p(t)$;

— детерминированная или стохастическая модель.

Индекс системной согласованности. Условия согласованности интересов (5), (7) можно проверить в более слабой форме с помощью индекса системной согласованности

$$SCI = J_0^{\max} - J_0^{NE},$$

$$\text{где } J_0^{\max} = \max_{p \in P, q \in Q} \max_{u \in U(q)} J_0(p, q, u),$$

$$J_0^{NE} = \max_{p \in P, q \in Q} \max_{u \in NE(p, q)} J_0(p, q, u).$$

Тогда системная согласованность имеет место при $SCI = 0$. Условие $SCI \approx 0$ говорит о некотором приближении к системной согласованности.

Некоторые частные типы Центра. Иногда при решении задачи (3), (4), (10)—(13) удобно выделить:

— бескорыстный Центр $J_0(\cdot) \equiv J_0$, заинтересованный только в обеспечении условия гомеостаза (4). Тогда множество $U^{\max}$ не нужно и остается проверка условия $\exists(p, q) \in P \times Q: U(p, q) \neq \emptyset$;

— максимизирующий общественное благосостояние Центр $J_0(\cdot) = J(\cdot) = \sum_{i \in N} J_i(u(\cdot))$. Тогда интересы Центра и агентов сопоставлены.

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СТИМУЛИРОВАНИЯ

Частным случаем задачи управления устойчивым развитием можно считать модель стимулирования

$$J_0 = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left[H(x(t), u(t)) - \sum_{i \in N} p_i(x(t), u(t)) \right] dt \rightarrow \max_{p(\cdot)},$$

$$J_i = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [p_i(x(t), u(t)) - h_i(x(t), u(t))] dt \rightarrow \max_{u_i(\cdot)},$$

$$i \in N,$$

в силу ограничений (3) и (4), где $H(x, u)$ — функция дохода Центра, возрастающая и вогнутая по обоим аргументам, $H(0, 0) = 0$; $h_i(x, u)$ — функция затрат i -го агента, возрастающая и выпуклая по обоим аргументам, $h_i(x, u) = 0$; $p_i(x, u)$ — неотрицательная функция компенсации затрат агента Центром, J_0, J_i — функционалы выигрыша Центра и агента соответственно.

Исходя из результата, полученного в работе [6] для статической модели стимулирования, естественно ожидать, что оптимальный механизм стимулирования должен иметь вид

$$p_i^*(x^*(t), u^*(t)) =$$

$$\begin{cases} h_i(x^*(t), u_i^*(t), u_{-i}^*(t)) + \varepsilon_i(t), & u_i(t) = u_i^*(t), \\ 0, & \text{иначе, } i \in N, \end{cases}$$

где $u^*(t)$ — решение вспомогательной задачи оптимального управления

$$\int_0^{\infty} e^{-\rho t} \left[H(x(t), u(t)) - \sum_{i \in N} h_i(x(t), u(t)) \right] dt \rightarrow \max$$

в силу ограничений (2)—(4), $\varepsilon_i(t)$ — неотрицательная мотивирующая надбавка i -му агенту как функция времени.

Пока в работе [32] изучена динамическая версия базовой задачи стимулирования «Центр — агент» на бесконечном периоде с дискретным временем и функционалами выигрыша Центра и агента в виде математических ожиданий. Показано, что ε -оптимальная стратегия Центра основана на решении задачи оптимального управления с целевым функционалом, равным разности функций дохода ведущего (Центра) и затрат ведомого, т. е. действительно получено непосредственное обобщение соответствующего результата для статической модели стимулирования [6]. При этом в доказательстве явно не используется построение механизма поощрения-наказания, как в статье [33] или работах из обзора [34]. Теорема первоначально до-

казана для полунепрерывных сверху функций и затем распространена на универсально измеримые функции. Отметим, что ε -добавка в определении найденной ε -оптимальной стратегии Центра может трактоваться как мотивирующая надбавка, которая тем больше, чем ниже дальновидность исполнителя.

3. ДИНАМИЧЕСКИЕ СОЧИ-МОДЕЛИ

Представляет интерес динамическое обобщение моделей сочетания общественных и частных интересов (СОЧИ-моделей) [35, 36] с учетом требований гомеостаза. В статической версии модели агенты распределяют имеющиеся у них ресурсы $r_i > 0$ между инвестициями в производство некоторого общественного блага в размере $0 \leq u_i \leq r_i$ и частной деятельностью в размере соответственно $r_i - u_i$. Частная деятельность приносит агенту доход в размере $p_i(r_i - u_i)$, а совокупные инвестиции всех агентов влекут производство общественного блага в объеме $c(u_1, \dots, u_n)$, из которого потом агент получает долю $s_i c(u_1, \dots, u_n)$, $0 \leq s_i \leq 1$, $i \in N$. Таким образом, функция выигрыша агента есть $g_i(u) = p_i(r_i - u_i) + s_i c(u)$, $u = (u_1, \dots, u_n)$.

Динамическая СОЧИ-модель управления устойчивым развитием имеет вид

$$J_0 = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [s_0(t)x(t) - D(q(t))] dt \rightarrow \max, \quad (14)$$

$$\sum_{i=0}^n s_i(t) = 1, \quad s_i(t) \geq 0, \quad 0 \leq q_i(t) \leq r_i, \quad i \in N; \quad (15)$$

$$J_i = \int_0^{\infty} e^{-\rho t} [p_i(r_i - u_i(t)) + s_i(t)x(t)] dt \rightarrow \max, \quad (16)$$

$$q_i(t) \leq u_i(t) \leq r_i, \quad i \in N; \quad (17)$$

$$\dot{x} = c(u(t)) - \mu x(t), \quad x(0) = x_0 \quad (18)$$

с учетом требования гомеостаза (4).

Здесь $q(t) = (q_1(t), \dots, q_n(t))$; $u(t) = (u_1(t), \dots, u_n(t))$; $q_i(t)$ — управление принуждения Центра, ограничивающее снизу индивидуализм i -го агента; $D(q)$ — возрастающая выпуклая функция затрат Центра на принуждение, $D(0) = 0$; $s_i(t)$ — управление побуждения Центра (доля соответствующего агента или самого Центра при $i = 0$ в общественном благе); x — величина общественного блага (переменная состояния); μ — коэффициент амортизации общественного блага. Более адекватна, но и более сложна версия модели (14)–(18) с динамическими ресурсами, когда $r_i = r_i(t)$, $\dot{r}_i = k_i g_i(x(t), u(t))$, $r_i(0) = r_{i0}$, $k_i \geq 0$ — заданная константа или $k_i = k_i(t)$,

$0 \leq k_i \leq 1$ — еще одно управление агента, $i \in N$. Для решения поставленных задач целесообразно воспользоваться численными методами и имитационным моделированием.

4. ДРУГИЕ ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ

Изложенная концепция управления устойчивым развитием активных систем применена к решению прикладных задач в ряде различных предметных областей. Задачи управления на сетях [37–39] развиты применительно к маркетингу с учетом требований устойчивого развития в статье [40].

В работах [41, 42] построена статическая трехуровневая теоретико-игровая модель системы контроля водяного балласта судов. Применяются методы иерархического управления (побуждение и принуждение) при одновременном учете условий поддержания системы в заданном состоянии. Проводится сравнение результатов исследования модели в смысле игр Гермейера Γ_1 и Γ_2 . Приведены примеры численных расчетов в ряде характерных случаев.

В статье [43] представлена математическая модель, описывающая деятельность субъектов вертикальной маркетинговой системы с учетом экологических требований. В роли субъектов управления выступают: производитель, посредник, с которым у производителя заключен договор комиссии, и торговое предприятие, реализующее в розничной сети продукцию производителя. Предполагается, что основная цель производителя состоит в выполнении экологических требований. Предложен алгоритм построения равновесия Штакельберга в игре трех лиц с учетом требования гомеостаза экологической подсистемы. В качестве метода иерархического управления применяется метод побуждения. Приведен ряд характерных примеров с последующей интерпретацией полученных результатов.

Построению и исследованию дифференциально-игровой модели предотвращения заморов в мелководных водоемах посвящена статья [44]. Предложены алгоритмы исследования модели в случае информационных регламентов динамических игр Гермейера Γ_{1x} и Γ_{2x} . Задача решается численно с помощью разработанного параллельного алгоритма, учитывающего архитектуру супер-ЭВМ с распределенной памятью. Предлагаемый алгоритм численного решения поставленной задачи на супер-ЭВМ с помощью метода k -средних позволяет существенно сократить время работы программного комплекса, численно реализующего модельную задачу динамики взаимодействующих популяций в Азовском море. Разработанные модели применя-

ются для прогнозирования изменения биомассы биологических популяций в мелководных водоемах с учетом требований устойчивого развития.

Статья [45] демонстрирует применение концепции управления устойчивым развитием борьбы с эвтрофикацией мелководных водоемов (на примере Азовского моря). Динамика состояния водоема описывается уравнениями в частных производных, которые решаются численно методом конечных разностей. Решается динамическая задача минимизации затрат на поддержание экосистемы водоема в заданном состоянии, которое интерпретируется как требование гомеостаза. Приведены примеры численных расчетов, проведен анализ полученных результатов.

Динамические теоретико-игровые модели двухуровневых систем управления с учетом условий устойчивого развития исследуются в статье [46]. В качестве механизмов иерархического управления рассматриваются методы принуждения и побуждения. Даны определения равновесий и приведены алгоритмы их построения на основе имитационного моделирования для различных информационных регламентов. Проведен сравнительный анализ эффективности указанных механизмов управления для модели экосистемы мелководного водоема (на примере Азовского моря).

Статья [47] посвящена исследованию динамических СОЧИ-моделей с помощью метода имитационного моделирования. Для игр Гермейера описаны и реализованы следующие регламенты иерархического управления: программные стратегии, побуждение; программные стратегии, принуждение; программные и позиционные стратегии, побуждение; программные и позиционные стратегии, принуждение.

Исследована двухуровневая модель оптимального рыболовства при неопределенности параметров в статье [48]. Изучен случай двух иерархически упорядоченных агентов: государства (регулятор) и рыболовного предприятия (рыбак). Регулятор считается дальновидным, а рыбак — близоруким. Динамика рыбной популяции описана нелинейным разностным уравнением. Предполагается, что это уравнение и функция выигрыша рыбака содержат параметры, неизвестные регулятору. Доказано, что функция значения этой задачи удовлетворяет уравнению Айзекса — Беллмана, описана оптимальная стратегия регулятора. Приведены два иллюстративных примера.

В статье [49] рассматривается применение системного подхода к управлению устойчивым развитием региона на базе теоретико-игровых моделей и информационных технологий. Определяется понятие региональной активной системы. Понятие устойчивого развития региона дополняется требованием системной согласованности. Устойчи-

вое развитие означает, что хозяйственная деятельность должна обеспечивать достаточно высокие значения социально-экономических индикаторов, не нарушая в то же время требований экологического равновесия. Формально, все показатели состояния региональной социо-эколого-экономической системы должны находиться в заданных диапазонах. В свою очередь, системная согласованность означает, что при достижении своих целей Центр должен максимально учитывать интересы активных агентов. Для количественной оценки системной согласованности применяется соответствующий индекс. Описаны административные и экономические механизмы управления, обеспечивающие системную согласованность.

В работах [50, 51] исследуется задача управления, которая заключается в распределении двумя соседними субъектами средств между развитием своей и общей (трансграничной) территории. Для координации деятельности вводится специальный орган управления (координатор, Центр). Экономический механизм исследуется в двух вариантах (управление долей участия в доходе от развития общей территории и распределение ресурса). Приводится детальный анализ указанных механизмов, а также организационно-экономическая интерпретация для конкретных задач территориального управления.

Динамические СОЧИ-модели инновационного развития корпорации исследуются в статье [52]. Динамика системы описывается нелинейным разностным уравнением. Для исследования предложенной модели инновационного развития применяются имитация и метод перебора областей допустимых управлений субъектов с некоторым шагом. Основным результатом работы — сравнительный анализ эффективности методов иерархического управления для информационных регламентов Штакельберга/Гермейера при принуждении/побуждении (четыре регламента) с помощью индексов системной согласованности. Относительно информационного регламента иерархической игры приняты предположения: все игроки применяют программные стратегии; ведущий выбирает и сообщает ведомым экономические либо административные управления, которые могут быть только функциями времени (игры Гермейера Γ_{1r}) либо зависеть также от управлений ведомых (игры Гермейера Γ_{2r}); при известных стратегиях ведущего ведомые одновременно и независимо выбирают свои стратегии, что приводит к равновесию Нэша в игре ведомых. За конечное число итераций предложенный алгоритм имитационного моделирования позволяет построить приближенное решение модели или сделать вывод, что равновесия не существует. Достоверность и эффективность предложенного алгоритма следуют из свойств методов

сценариев и прямого упорядоченного перебора с постоянным шагом. Предлагаемая модель носит универсальный характер и может быть полезна для научно обоснованной поддержки программ инвестиционного развития компаний всех отраслей экономики. Специфика конкретной компании учитывается в ходе идентификации модели. Получен ряд содержательных выводов относительно сравнительной эффективности методов иерархического управления инновациями.

В работах [53, 54] описывается междисциплинарная методология исследования социального партнерства на примере дополнительного профессионального образования. Математический аппарат дифференциальных игр позволяет провести количественный сравнительный анализ эффективности различных способов организации социального партнерства (изоляция, иерархия, кооперация), учесть необходимость согласования частных и общественных интересов. Обсуждаются методика идентификации математических моделей с учетом данных социологических опросов и сценарный подход к решению дифференциальных игр на базе компьютерной имитации.

5. ПРИМЕР

Рассмотрим упрощенный пример, иллюстрирующий введенные в статье понятия. Пусть имеется множество $N = \{1, \dots, n\}$ агентов-природопользователей, для определенности эксплуатирующих рыбную популяцию. Динамика популяции с учетом вылова описывается уравнением

$$\dot{x} = \left[a - \sum_{j \in N} u_j(t) \right] x(t), \quad x(0) = x_0. \quad (19)$$

Здесь $x(t)$ — биомасса популяции в году t ; x_0 — начальное значение биомассы; $a > 0$ — коэффициент естественного прироста популяции; $u_i(t)$ — доля вылова i -м агентом,

$$0 \leq u_i(t) \leq 1, \quad i \in N. \quad (20)$$

Интересы каждого агента описываются стремлением к максимизации выигрыша

$$J_i = \int_0^T e^{-\rho t} u_i(t) x(t) dt \rightarrow \max, \quad (21)$$

где T — период рассмотрения, $0 \leq \rho \leq 1$ — коэффициент дисконтирования. Условие гомеостаза для рыбной популяции имеет вид

$$\forall t \quad x(t) \geq x^*, \quad (22)$$

где x^* — критическое значение биомассы популяции.

Вообще говоря, агенты не заинтересованы в выполнении условия гомеостаза (22). Найдем равновесие Нэша в игре агентов (19)–(21). Функция Гамильтона для i -го агента

$$H_i(x, u_i, \lambda_i) = u_i x + \lambda_i \left(a - \sum_{j \in N} u_j \right), \quad i \in N.$$

В силу линейности модели

$$\frac{\partial H_i}{\partial u_i} = (1 - \lambda_i)x,$$

т. е. оптимальные управления могут быть $u_i = 0$ или $u_i = 1$. Поскольку при $u_i = 0$ выигрыш агента $J_i = 0$, то имеет смысл рассматривать случай $u_i = 1$. Тогда уравнение динамики (19) принимает вид

$$\dot{x} = (a - n)x(t), \quad x(0) = x_0,$$

откуда

$$x(t) = x_0 e^{(a-n)t},$$

$$J_i = x_0 \int_0^T e^{(a-\rho-n)t} dt = \frac{x_0 (e^{(a-\rho-n)T} - 1)}{a - \rho - n} > 0.$$

Таким образом, действительно $NE = \{(1, \dots, 1)\}$. Для нахождения множества U^* надо решить неравенство

$$x_0 \exp\left(\left(a - \sum_{j \in N} u_j(t)\right)t\right) \leq x^*,$$

откуда получаем условие

$$\forall t \quad \left(a - \sum_{j \in N} u_j(t)\right)t \geq \ln \frac{x^*}{x_0}.$$

Логарифм в правой части всегда не положителен, поскольку по биологическому смыслу $x_0 \geq x^*$ (начальная численность биомассы не меньше критической). Поэтому удобнее переписать полученное условие в виде

$$\forall t \quad \left(\sum_{j \in N} u_j(t) - a\right)t \leq \ln \frac{x_0}{x^*}.$$

Если скобка в левой части отрицательна, то всегда $U^* \neq \emptyset$, иначе непустота этого множества зависит от соотношения параметров.

Наконец, рассмотрим множество $U_{DG} = NE \cap U^*$. Оно не пусто, если выполняется условие

$$\forall t \quad (n - a)t \leq \ln \frac{x_0}{x^*}. \quad (23)$$

Таким образом, вопрос о непустоте множества U_{DG} и тем самым о разрешимости задачи управления устойчивым развитием (19)–(22) зависит от соотношения значений параметров модели. Вероятность выполнения условия (23) тем выше, чем больше коэффициент естественного прироста рыбной популяции, меньше число рыбаков и больше отношение начальной численности биомассы популяции к ее критическому значению.

Кооперация агентов приводит к задаче оптимального управления

$$J = \sum_{i \in N} J_i \rightarrow \max \quad (24)$$

с ограничениями (19), (20). Поскольку функция Гамильтона для этой задачи имеет вид

$$H(x, u, \lambda) = x \sum_{j \in N} u_j + \lambda \left(a - \sum_{j \in N} u_j \right) x,$$

то ее решение совпадает с решением игры (19)–(21), т. е. $\bar{U} = NE = \{(1, \dots, 1)\}$, и непустота множества $U_{OC} = U^* \cap \bar{U}$ вновь определяется условием (23).

Теперь введем Центр, который интерпретируется как орган управления некоторого уровня, отвечающий за выполнение экологических требований. Пусть функционал выигрыша Центра определяется формулой (24). Тогда экономические интересы Центра и агентов совпадают и заключаются в максимизации вылова, однако главная цель Центра — обеспечение требования гомеостаза (22). Для выполнения этого условия Центр применяет метод принуждения, а именно, назначает квоты на вылов рыбы

$$0 \leq u_i(t) \leq q_i(t) \leq 1, \quad i \in N. \quad (25)$$

Очевидно, тогда равновесие Нэша в игре агентов (19), (21), (25) примет вид

$$NE = \{(q_1(t), \dots, q_n(t))\}.$$

Имеем также $U^{\max} = U_{NE}^{\max} = NE$. Множества $U_{\max}^*$ и $U_{NE}^*(q)$ определяются условиями

$$\forall t \left(\sum_{j \in N} q_j(t) - a \right) t = \ln \frac{x_0}{x^*}.$$

Наконец,

$$U_{HDC}(q) = U_{NE}^{\max} \cap U_{\max}^* \cap U_{NE}^*(q) = \left\{ (q_1(t), \dots, q_n(t)) : \forall t \left(\sum_{j \in N} q_j(t) - a \right) t = \ln \frac{x_0}{x^*} \right\}.$$

Таким образом, для выполнения требования гомеостаза суммарный вылов придется со временем уменьшать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена концепция управления устойчивым развитием активных систем. Под активными системами понимаются произвольные динамические системы с участием людей, состоящие из активных элементов. Активные элементы способны к самостоятельному целеполаганию, стратегическому поведению и сознательному искажению информации в собственных интересах. Устойчивое развитие предполагает выполнение требований гомеостаза (некоторых динамических условий на состояние объекта управления) и системной согласованности (учета интересов активных агентов, призванных обеспечивать гомеостаз).

Математическая формализация задачи управления устойчивым развитием активных систем осуществляется с помощью дифференциальных игр в нормальной форме, форме характеристической функции и с иерархической структурой, где условие гомеостаза отражается через фазовые ограничения. Приведены постановки таких задач и указаны методы их решения.

Рассмотрены два частных класса задач управления устойчивым развитием: динамические модели стимулирования и динамические модели сочетания общественных и частных интересов (СОЧИ-модели). Обсуждены соответствующие постановки

задач, для динамической модели стимулирования приведен результат, обобщающий известный аналог для статической версии. Основная область применения моделей стимулирования — организационное управление, СОЧИ-модели полезны при распределении ресурсов. Дан обзор ряда прикладных задач в различных предметных областях, решаемых на основе предлагаемой концепции. Приведен упрощенный иллюстративный пример, демонстрирующий введенные в статье понятия, в частности, показывающий возможность непустоты различных множеств управлений.

Описанная концепция образует теоретический фундамент создания современных систем управления научно-технологическим развитием, продвижением инноваций, подготовкой кадров для науки и экономики, охраной окружающей среды и рациональным использованием природных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Burkov V.N., Lerner A.Ya.* Fairplay in control of active systems // Differential games and related topics. — Amsterdam, London: North-Holland Publishing Company, 1971. — P. 164—168.
2. *Бурков В.Н., Онойцев В.И.* Метаигровой подход к управлению иерархическими системами // Автоматика и телемеханика. — 1974. — № 1. — С. 103—114.
3. *Бурков В.Н.* Основы математической теории активных систем. — М.: Наука, 1977. — 255 с.
4. *Бурков В.Н., Данев Б., Еналеев А.К. и др.* Большие системы: моделирование организационных механизмов. — М.: Наука, 1989. — 245 с.
5. *Бурков В.Н., Новиков Д.А.* Теория активных систем: состояние и перспективы. — М.: СИНТЕГ, 1999. — 128 с.
6. *Новиков Д.А.* Теория управления организационными системами. — М.: Изд-во физ.-мат. лит., 2007. — 584 с.
7. *Механизмы управления* / Под ред. Д.А. Новикова. — М.: Ленанд, 2011. — 192 с.
8. *Горелик В.А., Кононенко А.Ф.* Теоретико-игровые модели принятия решений в эколого-экономических системах. — М.: Радио и связь, 1982. — 144 с.
9. *Горелик В.А., Горелов М.А., Кононенко А.Ф.* Анализ конфликтных ситуаций в системах управления. — М.: Радио и связь, 1991. — 288 с.
10. *Laffont J.-J., Martimort D.* The Theory of Incentives: The Principal-Agent Model. — Princeton University Press, 2002. — 421 p.
11. *Algorithmic Game Theory* / ed. by N. Nisan, T. Roughgarden, E. Tardos, V. Vazirani. — Cambridge University Press, 2007. — 754 p.
12. *Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С.* Экологический вызов и устойчивое развитие. — М.: Прогресс-Традиция, 2000. — 416 с.
13. *Переход к устойчивому развитию: глобальный, региональный и локальный уровни. Зарубежный опыт и проблемы России* / Рук. авт. колл. Н.Ф. Глазовский. — М., 2002. — 444 с.
14. *Adams W.M., Jeanrenaud S.J.* Transition to Sustainability: Towards a Humane and Diverse World. — Gland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2008. — 107 p.
15. *Clark W.C.* Sustainability Science: A Room of its Own // Proc. of the National Academy of Science. — 2007. — Vol. 104, N 6. — P. 1737—1738.
16. *Our Common Future.* World Commission on Environment and Development (WCED). — Oxford, 1987. — 416 p.
17. *Aubin J.-P.* Viability Theory. — Springer-Verlag, 1991. — 572 p.



18. Cairns R.D., Martinet V. An environmental-economic measure of sustainable development // *European Economic Review*. — 2014. — Vol. 69. — P. 4–17.
19. Doyen L., Martinet V. Maximin, viability and sustainability // *J. of Econ. Dynamics and Control*, 2012 (36). — P. 1414–1430.
20. Угольников Г.А. Управление устойчивым развитием активных систем. — Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2016. — 940 с.
21. Угольников Г.А. Теоретико-игровое исследование некоторых способов иерархического управления // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. — 2002. — № 1. — С. 97–101.
22. Ougolnitsky G. Game theoretic formalization of the concept of sustainable development in the hierarchical control systems // *Annals of Operations Research*. — 2014. — Vol. 220, N 1. — P. 69–86.
23. *Differential Games in Economics and Management Science* / Dockner E., Jorgensen S., Long N.V., Sorger G. — Cambridge: Cambridge University Press, 2000. — 382 p.
24. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Шевкопляс Е.В. Теория игр. — СПб.: БХВ-Петербург, 2012. — 432 с.
25. Basar T., Olsder G.Y. Dynamic Non-Cooperative Game Theory. — Philadelphia: SIAM, 1999. — 506 p.
26. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. — М.: Наука, 1983. — 393 с.
27. *Optimal Control of Nonlinear Processes (with Applications to Drugs, Corruption, and Terror)* / Grass D., Caulkins J.P., Feichtinger G., Tragler G., Behrens D.A. — Springer, 2008. — 529 p.
28. Угольников Г.А., Усов А.Б. Равновесия в моделях иерархически организованных динамических систем с учетом требований устойчивого развития // *Автоматика и телемеханика*. — 2014. — № 6. — С. 86–102.
29. Белявский Г.И., Данилова Н.В., Угольников Г.А. Эволюционное моделирование в задачах управления устойчивым развитием активных систем // *Математическая теория игр и ее приложения*. — 2016. — Т. 8, вып. 4. — С. 14–29.
30. Ougolnitsky G.A., Usov A.B. Computer Simulations as a Solution Method for Differential Games // *Computer Simulations: Advances in Research and Applications*. Eds. M.D. Pfeffer and E. Bachmaier. — N.Y.: Nova Science Publishers, 2018. — P. 63–106.
31. Olsder G.J. Phenomena in inverse Stackelberg games, part 2: Dynamic problems // *Journal of Optimization Theory and Applications*. — 2009. — Vol. 143, iss. 3. — С. 601–618.
32. Рохлин Д.Б., Угольников Г.А. Равновесие Штакельберга в динамической модели стимулирования с полной информацией // *Автоматика и телемеханика*. — 2018. — № 4. — С. 152–166.
33. Gorelov M.A., Kononenko A.F. Dynamic models of conflicts. III. Hierarchical games // *Automation and Remote Control*. — 2015. — Vol. 76, N 2. — P. 264–277.
34. Li M., Cruz J.B., Simaan M.A. An Approach to Discrete-Time Incentive Feedback Stackelberg Games // *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. Part A: Systems and Humans*. — 2002. — Vol. 32, N 4. — P. 472–481.
35. Горбанева О.И., Угольников Г.А. Цена анархии и механизмы управления в моделях согласования общественных и частных интересов // *Математическая теория игр и ее приложения*. — 2015. — Т. 7, вып. 1. — С. 50–73.
36. Gorbaneva O.I., Ougolnitsky G.A. System Compatibility, Price of Anarchy and Control Mechanisms in the Models of Concordance of Private and Public Interests // *Advances in Systems Science and Applications*. — 2015. — Vol. 15, N 1. — P. 45–59.
37. Губанов Д.А., Новиков Д.А., Чхартишвили А.Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. — М.: Физматлит, 2010. — 228 с.
38. Белов М.В., Новиков Д.А. Сетевые активные системы: модели планирования и стимулирования // *Проблемы управления*. — 2018. — № 1. — С. 47–57.
39. Робертс Ф. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. — М.: Наука, 1986. — 497 с.
40. Агиева М.Т. Модели управления на социальных сетях в маркетинге // *Инженерный вестник Дона*. — 2018. — № 1. — URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4670> (дата обращения: 22.11.2018).
41. Угольников Г.А., Усов А.Б., Рыжкин А.И. Метод побуждения в играх Гермейера при моделировании трехуровневой системы управления судовыми балластными водами // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2014. — Т. 6, № 4. — С. 535–542.
42. Угольников Г.А., Усов А.Б., Рыжкин А.И. Метод принуждения в играх Гермейера при моделировании трехуровневой системы управления судовыми балластными водами // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2015. — Т. 7, № 2. — С. 281–288.
43. Назиров А.Э., Угольников Г.А., Усов А.Б. Теоретико-игровая модель трехуровневой маркетинговой системы с учетом экологических требований // *Управление большими системами*. — 2015. — Вып. 55. — С. 326–342.
44. Никитина А.В., Пучкин М.В., Семенов И.С. и др. Дифференциально-игровая модель предотвращения заморов в мелководных водоемах // *Управление большими системами*. — 2015. — Вып. 55. — С. 343–361.
45. Никитина А.В., Сухинев А.И., Угольников Г.А. и др. Оптимальное управление устойчивым развитием при биологической реабилитации Азовского моря // *Математическое моделирование*. — 2016. — Т. 28, № 7. — С. 96–106.
46. Угольников Г.А., Усов А.Б., Пучкин М.В. и др. Теоретико-игровые регламенты механизмов управления устойчивым развитием мелководных экосистем // *Автоматика и телемеханика*. — 2017. — № 6. — С. 122–137.
47. Оноприенко А.Н., Угольников Г.А., Усов А.Б. Имитационное моделирование иерархических регламентов управления (на примере рыболовства) // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. — 2016. — № 4. — С. 25–29.
48. Rokhlin D.B., Ougolnitsky G.A., Usov A.B. A two-level model of optimal harvesting under parameter uncertainty // *Far East Journal of Mathematical Sciences*. — 2017. — Vol. 102, N 7. — P. 1365–1380.
49. Ougolnitsky G.A. A System Approach to the Regional Sustainable Management // *Advances in Systems Science and Applications*. — 2017. — Vol. 17, N 2. — P. 52–62.
50. Анопоченко Т.Ю., Мурзин А.Д., Угольников Г.А. Моделирование согласования интересов в задачах управления устойчивым развитием территорий // *Экономика природопользования*. — 2017. — № 6. — С. 35–47.
51. Горбанева О.И., Мурзин А.Д., Угольников Г.А. Механизмы согласования интересов при управлении проектами развития территорий // *Управление большими системами*. — 2018. — Вып. 71. — С. 61–97.
52. Угольников Г.А., Усов А.Б. Теоретико-игровая модель согласования интересов при инновационном развитии корпорации // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2016. — Т. 8, № 4. — С. 673–684.
53. Dyachenko V.K., Ougolnitsky G.A., Tarasenko L.V. Computer Investigation of a Game Theoretic Model of Social Partnership in the System of Continuing Professional Education // *Advances in Systems Science and Applications*. — 2015. — Vol. 15, N 4. — P. 320–328.
54. Нор-Аревян О.А., Тарасенко Л.В., Угольников Г.А. Математическое моделирование социального партнерства: методология междисциплинарного исследования (на примере системы дополнительного профессионального образования) // *Социологические исследования*. — 2018. — № 4. — С. 15–24.

Статья представлена к публикации членом редколлегии чл.-корр. РАН Д.А. Новиковым.

Угольников Геннадий Анатольевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, gaugolnickiy@sfdedu.ru.

Поступила в редакцию 03.05.2018, после доработки 18.06.2018.

Принята к публикации 27.09.2018.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ШОКИ В МНОГОСЕКТОРНОЙ МОДЕЛИ НЕСОВЕРШЕННОЙ КОНКУРЕНЦИИ

А.В. Леонидов, Е.Е. Серебрянникова

Представлен анализ последствий воздействия технологических шоков на экономическую систему в рамках описанной ранее динамической многосекторной модели с несовершенной конкуренцией. Показано, что отличительная особенность модели состоит в асимметрии откликов системы на негативные и положительные шоки. А именно, экономический спад, следующий за отрицательным шоком, оказывается больше в абсолютном выражении, чем подъем после положительного шока той же амплитуды. Показано, что воздействие шоков такого рода приводит к изменению структуры сети «затраты — выпуск».

Ключевые слова: шок, сеть «затраты — выпуск», агентная модель, компьютерная симуляция.

ВВЕДЕНИЕ

Гетерогенность отдельных элементов и их связанность, обусловленная экономическими взаимодействиями, — неотъемлемые характеристики такой сложной системы, как современная экономика. В частности, гетерогенность свойств экономических агентов проявляется в разнообразии отраслей, составляющих экономическую систему. Выполняя принципиально разные функции, фирмы, относящиеся к различным секторам экономики, связаны между собой производственными цепочками. В математических терминах совокупность таких производственных цепочек, реализующих экономические взаимодействия между фирмами, относящимися к различным секторам экономики, образует сетевую структуру, характеризующуюся взвешенным ориентированным графом. Учет такой порожденной многосекторностью структуры, характеризующей одновременно гетерогенностью и наличием экономических взаимодействий, крайне важен для описания фундаментальных свойств рассматриваемой макроэкономической системы. В частности, можно ожидать нетривиальных сетевых эффектов при рассмотрении последствий секторальных шоков. Так, основная цель данной работы заключается в том, чтобы показать, что одновременный учет многосекторности экономики и присутствия элементов несовершенной конкуренции приводит к возникновению ряда интересных последствий воздействия шоков совокупной факторной производительности отдельных секторов. Из данного обстоятельства

прямо следует, что однопродуктовые модели, построенные на предпосылке присутствия совершенной конкуренции, могут упускать ряд важных особенностей функционирования экономической системы.

Первое описание свойств многосекторной экономики с помощью матриц «затраты — выпуск» восходит к работам Василия Леонтьева [1], давшим начало направлению моделирования межотраслевого взаимодействия. Модели такого рода (см., например, работы [2—5]) были популярны в 1960—1970-е гг., когда они применялись для решения конкретных прикладных задач анализа и управления развитием экономики. Эволюция экономик середины 1980-х гг. привела к существенному усложнению межотраслевых связей, что стало одной из причин перехода к однопродуктовым моделям, единственный производимый продукт в которых трактуется как весь объем ВВП. В поддержку этой точки зрения обычно приводится два основных аргумента. Прежде всего, широко известен аргумент о диверсификации шоков в экономике, состоящей из большого числа независимых и однородных фирм [6], вследствие чего флуктуации агрегированного выпуска для экономики большого размера параметрически малы¹. Другой

¹ Под параметрической малостью понимается стремление к нулю со скоростью, пропорциональной $1/\sqrt{N}$ отношения среднеквадратичного отклонения суммарного выпуска N независимых одинаковых фирм (секторов) к его среднему. Данное утверждение является следствием центральной предельной теоремы.



аргумент — интерпретация доказанного в работе [7] утверждения о том, что вклад шоков фирмы в волатильность совокупного выпуска определяется только размером ее выручки как утверждения об ее независимости от положения фирмы в цепочке поставок.

Однако кризисные события, начавшиеся в 2007 г., и последующий за этим новый виток изменений в мировой экономике выявили явления, которые могут быть описаны только посредством анализа взаимодействия разных отраслей. В этом контексте особенно интересны работы, в которых описываются эффекты возникновения самоорганизованной критичности в многосекторной экономике со связями специальной структуры [8, 9]. Однако важно, что в реальной экономике топология связей между секторами экономики отличается от стилизованной топологии, описанной в работах [8, 9], и, следовательно, большой интерес представляет изучение моделей, описывающих динамику многосекторной экономики на сети «затраты — выпуск» с реалистичной топологией. Современный подход к решению этой задачи описан в работах [10—14]. «Фундаментом» для данных моделей выступили многосекторные модели реального делового цикла [15—17]. Важно, что хотя ключевым объектом, описывающим взаимодействие между отраслями, в данных моделях и служит матрица «затраты — выпуск», модели такого рода не представляют собой продолжение леонтьевской традиции применения межотраслевых балансов. Принципиальное их отличие состоит в том, что производство отраслей описывается нелинейными производственными функциями, аргументами которых в том числе являются продукты, произведенные другими отраслями. Из этого прямо следует возможность замещения одних продуктов другими, отсутствующая в моделях межотраслевого баланса с леонтьевскими производственными функциями. Одна из задач состояла в том, чтобы с помощью моделей [15—17] показать, что в реальности фирмы связаны образующими сетевую структуру цепочками поставок; это не позволяет считать их независимыми и, как следствие, буквальное применение центральной предельной теоремы не представляется возможным. Кроме того, как показано в работе [18], даже в предположении о независимости фирм аргумент о наличии диверсификации вследствие параметрической малости флуктуаций не работает, если распределение размеров фирм имеет «тяжелые хвосты». Помимо этого, интерпретация результатов работы [7] в форме аргумента о независимости размера отклика от положения фирмы в цепочке поставок, вообще говоря, не является корректной, поскольку положение фирмы/сектора в производственной сетевой структуре существенно влияет на размер ее выпус-

ка [12, 13] и, следовательно, на размер отклика системы на технологические шоки. Кроме того, общность выводов, представленных в работе [7], может быть поставлена под сомнение вследствие использованного в ней лог-линеаризованного приближения, которое является точным только для производственной функции Кобба — Дугласа [19]. Как показано в работе [19], учет вкладов более высокого порядка в модели с производственными функциями CES приводит к существенному изменению результатов, полученных в лог-линеаризованном приближении. Вследствие этого, дальнейшее изучение влияния шоков отдельных секторов на агрегированные показатели в многосекторных макроэкономических моделях представляет существенный интерес.

Взаимосвязь секторов экономики вследствие вовлеченности фирм в производственные цепочки описывается взвешенным ориентированным графом «затраты — выпуск». Узлами этого графа служат отрасли экономических систем, наличие ребер отражает наличие взаимодействия в процессе производства, а их веса — объемы потоков товаров и услуг, используемых секторами для производства собственной продукции. Таблицы «затраты — выпуск», представляющие собой матрицы смежности такого графа, регулярно публикуются статистическими агентствами разных стран, что позволяет исследовать динамику показателей в моделях на реальных сетях.

В основе большинства встречающихся в литературе моделей, описывающих многосекторную экономику, лежит гипотеза наличия совершенной конкуренции на всех рынках и, при рассмотрении макроэкономической динамики, сеть «затраты — выпуск» не меняется во времени [10—17]. Основным результатом для моделей такого рода заключается в том, что размер отклика системы как на положительные, так и на отрицательные технологические шоки секторов определяется значением центральности PageRank секторов (элементами обратной матрицы Леонтьева) для графа «затраты — выпуск» [12, 13]. Однако данная зависимость может нарушаться при введении механизмов несовершенной конкуренции. Так, для характеристики результатов в равновесной модели с элементами несовершенной конкуренции, заключающимися в возможности входа (или выхода) фирм на рынок (или с рынка), а также в экзогенном изменении уровня зарплат менеджмента, в работе [14] были предложены центральности двух типов (центральность покупателя и центральность продавца), отличающиеся от значения PageRank. Введение механизмов несовершенной конкуренции другого рода было предложено в нашей работе [20], где была проанализирована неравновесная агентная модель, в которой цена на продукты устанавливается

производителями, и было показано, что в этой модели отклик на технологические шоки также определяется значением PageRank сектора. Однако, как продемонстрировано в настоящей работе, распространение шоков совокупной факторной производительности (СФП)² в данной модели характеризуется двумя интересными особенностями. Прежде всего, наличие несовершенной конкуренции приводит к асимметрии отклика на положительные и отрицательные технологические шоки. А именно, абсолютное значение глубины рецессии в экономике превышает уровень подъема, возникающего в ответ на противоположные по знаку шоки одинаковой амплитуды. Учет эффектов такого рода может оказаться существенным для описания распространения кризисных явлений в экономике. В частности, неучет подобного рода эффектов может привести к недооценке последствий для всей экономики воздействия шоков отдельных отраслей. Так, например, если проводится политика, направленная на стимулирование производства в отдельных отраслях, подвергшихся шоку, с целью предотвращения распространения данного шока на другие отрасли экономики, то ввиду наличия эффектов, связанных с асимметрией отклика, объем оказываемой поддержки должен быть больше, чем рассчитанный в рамках моделей, в которых асимметрия отклика отсутствует.

Вторая особенность заключается в том, что результат данной работы характеризует влияние шоков СФП отдельных секторов на эволюцию матрицы «затраты — выпуск». Так, существенный недостаток равновесных моделей как с совершенной [10—17], так и несовершенной конкуренцией [14] состоит в том, что при наличии шоков СФП-матрица «затраты — выпуск» остается неизменной. В то же время эмпирический анализ реальных сетей «затраты — выпуск» показывает наличие их существенной эволюции во времени [22—23]. Как показано в настоящей работе, особенностью динамической неравновесной модели, описанной в работе [20], заключается в том, что технологические шоки секторов (шоки СФП) приводят к временной эволюции структуры матрицы «затраты — выпуск». Недостаток модели, тем не менее, состоит в малости этих изменений по сравнению с вариативностью реальных матриц. Однако полученные результаты характеризуют интересное направление для дальнейших исследований в целях количественного описания реальной динамики сетей «затраты — выпуск». Структура настоящей работы: в § 1 представлено краткое описание динамической многосекторной модели с несовершенной

конкуренцией, предложенной в работе [20]; в § 2 представлены результаты анализа асимметрии отклика совокупного ВВП экономики в модели на положительные и отрицательные технологические шоки; анализ динамики матрицы «затраты — выпуск» в модели представлен в § 3; выводы и некоторые дополнительные замечания приведены в Заключение.

1. ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСОВЕРШЕННОЙ КОНКУРЕНЦИИ НА СЕТИ «ЗАТРАТЫ — ВЫПУСК»

Приведем краткое описание модели, представленной в работе [20]. Данная модель предполагает описание взаимодействия N фирм (представляющих секторы, находящиеся в вершинах графа) и N потребителей в дискретном времени на сети «затраты — выпуск». Каждый потребитель является работником одной из фирм и, тем самым, может рассматриваться как репрезентативный работник отрасли. Производители максимизируют прибыль от продажи своей продукции потребителям (конечное потребление) и другим секторам (промежуточное потребление). Поток промежуточного потребления определяют веса ребер сети «затраты — выпуск». Прибыль компаний распределяется между всеми потребителями в соответствии с их долями в капитале компаний. Отличительная особенность данной модели заключается в том, что производители не только выбирают оптимальный для себя объем выпуска и число факторов производства, но и устанавливают цену на собственную продукцию и заработную плату, действуя, таким образом, в условиях несовершенной конкуренции. Для реализации такой стратегии производители должны иметь представление о кривых спроса на продукцию и предложения труда. В данной модели предполагалось, что это представление описывается субъективными кривыми спроса [24, 25]. Формирование таких представлений у производителей происходит динамически, иными словами, в процессе функционирования системы производители обучаются на основе реализовавшихся размеров спроса (более подробное обсуждение предположек выбора такого подхода см. в работе [20]).

Поскольку модель построена в рамках агентной идеологии, наиболее наглядным ее описанием служит протокол, иллюстрирующий последовательность решений, принимаемых агентами, находящимися в узлах сети. Подробное описание процесса принятия решений агентами дано в работе [20]. Далее приведен лишь алгоритм принятия решений.

Шаг 1. К моменту времени t каждая фирма i обладает запасом Y_{it} произведенных товаров, готовых к реализации.

² В качестве примеров шоков СФП можно рассматривать изменения технологий производства, стихийные бедствия и изменения погодных условий и т. п.



Шаг 2. Представления производителей о виде кривой спроса описываются соотношением:

$$\frac{Y_{it+1}}{Y_{it}} = \xi_{it} \left(\frac{P_{it+1}/P_t}{P_{it}/P_{t-1}} \right)^{-\eta},$$

где P_{it} — цена на продукцию сектора i в момент времени t , P_t — общий уровень цен, определяющийся как среднее геометрическое цен отраслей, величина ξ_{it} оценивается производителем в каждом периоде с учетом реализовавшихся значений спроса и цен, а η — некоторый параметр. Используя эти представления, производитель устанавливает цену P_{it} на уже произведенный выпуск Y_{it} .

Шаг 3. Выпуск следующего периода производится из имеющихся на момент времени t товаров других секторов, а именно, описывается производственной функцией Кобба — Дугласа:

$$Y_{it+1} = A_{it+1} L_{it}^\alpha \left(\prod_{k \in S_i} X_{kit}^{\gamma_{ki}} \right)^{1-\alpha},$$

где A_{it+1} — СФП сектора i , L_{it} — использованный им объем труда, X_{kit} — объем промежуточного потребления товаров сектора k сектором i . Цены P_{kt} , $k = 1, \dots, N$, определяют размер издержек фирм на производство выпуска следующего периода. Зная цены P_{kt} , $k = 1, \dots, N$, каждая фирма планирует свое производство в следующем периоде, решая задачу максимизации ожидаемой прибыли следующего периода. Предполагается, что уровень заработной платы, также как и цен, устанавливается производителем с учетом субъективной функции предложения труда вида $L_{it} = \zeta_{it}(w_{it}/P_t)^\kappa$, где величина ζ_{it} оценивается производителем в каждом периоде с учетом реализовавшихся значений предложения труда и заработной платы, а κ — некоторый параметр. Результат решения задачи планирования — спрос на промежуточные факторы X_{kit}^{demand} (спрос сектора i на продукцию сектора k) и труд L_{it}^{demand} , а также уровень заработной платы.

Шаг 4. Зная уровень заработной платы, цены текущего периода, доходы предыдущего периода и имея ожидания относительно цен и доходов следующих периодов, потребитель решает задачу максимизации ожидаемой полезности вида

$$U_{jt} = E_t \sum_{s=0}^{\hat{T}} \beta^s u_{jt+s}(C_{jt+s}, L_{jt+s}) \rightarrow \rightarrow \max_{C_{jit+s}, L_{jit+s} \geq 0, i=1, \dots, N},$$

при ограничениях

$$\sum_{i=1}^N P_{it} C_{ijt} = w_{jt-1} L_{jt-1} + \sum_{i=1}^N \phi_{ji} \Pi_{it-1} + S_{jt-1},$$

$$\sum_{i=1}^N P_{it+s} C_{ijt+s} = w_{jt+s-1} L_{jt+s-1} + + \sum_{i=1}^N \phi_{ji} \Pi_{it+s-1}, s > 0,$$

$$u_{jt} = \sum_{i=1}^N \theta_{ji} \log(C_{jit}) - \psi_j L_{jt}^2, \quad \sum_{i=1}^N \theta_{ji} = 1,$$

где $u_{jt}(\cdot)$ — мгновенная функция полезности, $C_{jt} = (C_{1jt}, \dots, C_{Njt})$, β — норма дисконтирования, w_{jt} — заработная плата потребителя j во временном интервале $[t, t+1]$, ϕ_{ji} — доля потребителя j в прибыли компании i , Π_{it} — прибыль компании i , S_{jt} — остаток неизрасходованных средств потребителя j к моменту времени t , $\hat{T}$ — горизонт планирования потребителя. В результате определяется спрос потребителя j на конечное потребление продукции сектора i и предложение труда потребителя j : C_{ijt}^{demand} ($\forall i, j = 1, \dots, N$) и L_{jt}^{supply} .

Шаг 5. На рынке труда происходят транзакции по правилу $L_{it} = \min(L_{it}^{supply}, L_{it}^{demand})$.

Шаг 6. Транзакции на товарном рынке: $X_{ijt} = \min(X_{ijt}^{demand}, Y_{jt} X_{ij}^{demand} / D_{jt})$, $C_{ijt} = \min(C_{ijt}^{demand}, Y_{jt} C_{ij}^{demand} / D_{jt})$, где D_{jt} — совокупный спрос на продукцию фирмы j .

Шаг 7. Исходя из реальных продаж, фирмы рассчитывают прибыль предыдущего периода, запасы собственной продукции, переоценивают кривые спроса на свои товары и предложения труда. При переоценке кривых спроса учитывается, что в случае дефицита ($Y_{it} < D_{it}$) продукции на рынке фирма может не знать реальный объем спроса D_{it} . Для моделирования данного свойства вводился параметр Δ , так что в случае дефицита для переоценки кривой фирма использует величину $\bar{Y}_{it} = Y_{it} + \Delta(D_{it} - Y_{it})$ в качестве оценки спроса в момент времени t .

Шаг 8. Происходит распределение прибыли компаний потребителям и оценка сбережений. Убыток переносится компанией на следующий период.

Шаг 9. Реализуется значение совокупной факторной производительности A_{it} (шок СФП сектора i).

Шаг 10. Исходя из реально приобретенного числа факторов и с учетом нового значения СФП осуществляется производство нового выпуска. Нераспроданные остатки продукции переходят в следующий период в неизменном виде.

Шаг 11. Для момента времени $t + 1$ процедура повторяется.

На основе описанного алгоритма был проведен ряд численных симуляций, основная цель которых заключается в исследовании особенностей распространения технологических шоков секторов (шоков СФП) в многосекторной модели с несовершенной конкуренцией.

2. АСИММЕТРИЯ ОТКЛИКА НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ШОКИ

В большинстве описанных в литературе равновесных многосекторных моделей с совершенной конкуренцией отклик на технологические шоки (шоки СФП) исследовался только в предположении о том, что производство описывается функцией Кобба — Дугласа [10—13, 15—17], поэтому, как следствие, абсолютные значения откликов ВВП экономики на положительные и отрицательные шоки отдельных секторов с одинаковой амплитудой совпадают.

В работе [19] показано, что в равновесных моделях с совершенной конкуренцией и производственными функциями CES общего вида учет (отсутствующих для функции Кобба — Дугласа) членов второго порядка в разложении совокупного ВВП по значениям производственных шоков отдельных секторов может привести к асимметрии значений отклика на шоки разных знаков. Так, в статической модели с совершенной конкуренцией и производственной функцией CES разложение совокупного ВВП экономики³ (C) по значениям шока СФП сектора i (λ_i) имеет вид [19]:

$$\log(C) = \log(\bar{C}) + \Lambda_i \log(\lambda_i) + \Theta_i (\log(\lambda_i))^2,$$

где $\bar{C}$ — значение ВВП без шока ($\lambda_i = 1$, $i = 1, \dots, N$), значения $0 < \lambda_i < 1$ отвечают случаям отрицательных шоков, $\lambda_i > 1$ — случаям положительных шоков. Величины Λ_i и Θ_i определяются параметрами производственных функций секторов. Важно отметить, что величина Θ_i может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Тем самым, при $\Theta_i < 0$ возникает увеличение эффекта отрицательных шоков (по сравнению с ли-

нейным приближением) и, напротив, уменьшение эффекта положительных шоков. В частности, такой эффект характерен для экономики, в которой различные товары являются макро-комплементами. Противоположный эффект наблюдается при $\Theta_i > 0$. Случай $\Theta_i = 0$ отвечает производственным функциям Кобба — Дугласа. Очевидно, в данном случае приближение второго порядка совпадает с лог-линейным разложением и асимметрия отклика не наблюдается.

В динамических неравновесных моделях проявление асимметрии отклика экономики на шоки разных знаков можно ожидать не только как результат описанных эффектов, но и как следствие временного нарушения координации между агентами. Данный эффект продемонстрирован далее в рамках модели [20].

Аналогично работе [20], начальные значения переменных инициализировались на основе статистических данных World Input-Output Database (WIOD) для России (34 сектора, годовая периодичность данных, 1995—2009 гг.). Классификация секторов WIOD приведена в Приложении. Используемые в симуляциях значения параметров перечислены в табл. 1. Для простоты в данной работе мы не оцениваем эластичность выпуска отраслей по труду и не анализируем влияние изменения данной величины на динамику показателей, поскольку ее изменение не меняет качественных выводов, описываемых в работе. Результаты симуляций, описанные ниже, не претендуют на количественное соответствие эффектам, имеющим место в российской экономике. Цель данного анализа не в построении какого-либо прогноза, а в иллюстрации нетривиальных эффектов, возникающих при явном учете многосекторности экономики и введении в модель довольно реалистичных предположений о возможности присутствия несовершенства конкуренции на рынках.

Под технологическим шоком некоторого сектора k в данной модели понимается шок СФП этого сектора, т. е. событие, при котором в определенный момент времени t^* СФП этого сектора испытывает то или иное воздействие: $A_{kt^*} = \lambda_{kt} A_{kt^*-1}$, $\lambda_{kt} > 0$; $A_{kt} = A_{kt^*}$, $t > t^*$. При этом значения $\lambda_{kt} > 1$ отвечают положительным шокам, а значения $0 < \lambda_{kt} < 1$ — отрицательным. Во всех известных авторам равновесных многосекторных моделях с совершенной конкуренцией исследуется распространение по сети именно возмущений вследствие шоков СФП. Как уже отмечалось, абсолютные значения отклика совокупного выпуска экономики на положительные и отрицательные шоки одной амплитуды в равновесных моделях совпадают.

Иллюстрация отклика совокупного реального ВВП экономики на 5%-й положительный

³ В моделях такого рода совокупный ВВП экономики равен совокупному объему конечного потребления.

($\lambda_{1t} = 1,05$) и отрицательный ($\lambda_{1t} = 0,95$) шоки сектора 17 (Electricity, Gas and Water Supply) приведена на рис. 1 (как будет показано далее, отрицательный шок именно сектора 17 приводит к наибольшему отклику реального ВВП). Видно, что несмотря на то, что в долгосрочной перспективе значения отклика совокупного ВВП на положительный и отрицательный шоки совпадают, в краткосрочной перспективе амплитуда отклика на отрицательный шок (точка *A* на графике) значительно превосходит амплитуду отклика на положительный шок (точка *B*). Таким образом, если воздействие положительных технологических шоков приводит к постепенному росту ВВП, то отклик на отрицательный шок сопровождается периодом сравнительно глубокой и продолжительной рецессии. Кроме того, отметим различие характерных времен отклика на положительный и отрицательный шоки.

Описанный на примере сектора 17 эффект асимметрии откликов является общим для технологических шоков всех секторов экономики, что продемонстрировано на диаграмме (рис. 2). Как следует из этой диаграммы, значения отклика на положительные шоки сопоставима со значениями отклика на шоки в равновесной модели с совершенной конкуренцией Long & Plosser [15], тогда как степень воздействия отрицательных шоков больше отклика на положительные шоки в среднем более чем в 2 раза.

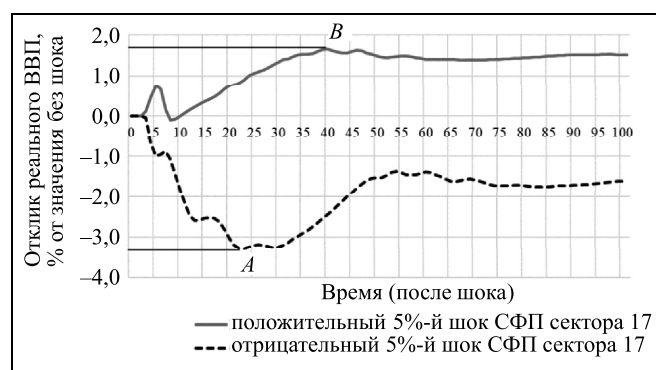


Рис. 1. Отклик реального ВВП на 5%-й отрицательный и положительный шоки СФП сектора 17 (Electricity, Gas and Water Supply): точки *A* и *B* иллюстрируют амплитуду отклика

Описанный эффект является следствием нарушения координации в анализируемой модели. А именно, негативный шок некоторого сектора *i* приводит к дефициту производимых им товаров, что вынуждает производителя *i* повышать цену. Если бы производитель *i* точно знал функцию спроса на собственную продукцию, то подстройка цены произошла бы мгновенно, и система сразу перешла бы в новое равновесие. Однако производители обладают лишь приблизительными представлениями о будущем спросе. В результате устанавливаемая цена может превысить оптимальную

Таблица 1

Значения параметров в симуляциях

Параметр	Значение в модели [20]	Значение
$\Gamma = \{\gamma_{ij}\}_{i,j=1,\dots,N}$	Коэффициенты производственных функций Кобба — Дугласа	Значения элементов нормированной по столбцу матрицы «затраты — выпуск» РФ 1995 г.
$\theta_{ip}, i = 1, \dots, N$	Коэффициенты мгновенной функции полезности потребителя	Доля затрат на конечное потребление продукции сектора <i>i</i> в совокупном объеме затрат на конечное потребление
$\bar{T}$	Длина периода, в котором оцениваются кривые спроса и предложения труда	12 (1 г., если считать такт модели равным 1 мес)
α	Эластичность выпуска по труду (параметр производственной функции Кобба — Дугласа)	0,3
β	Норма дисконтирования	0,99
$\varphi_{ij}, i, j = 1, \dots, N$	Доля потребителя <i>j</i> в прибыли фирмы <i>i</i>	$1/N$
η	Параметр субъективной функции спроса (эластичность спроса по цене)	1,5
κ	Параметр субъективной кривой предложения труда (эластичность предложения труда по заработной плате)	0,5
Δ	Объем доступной информации о спросе в предыдущем периоде	0,1

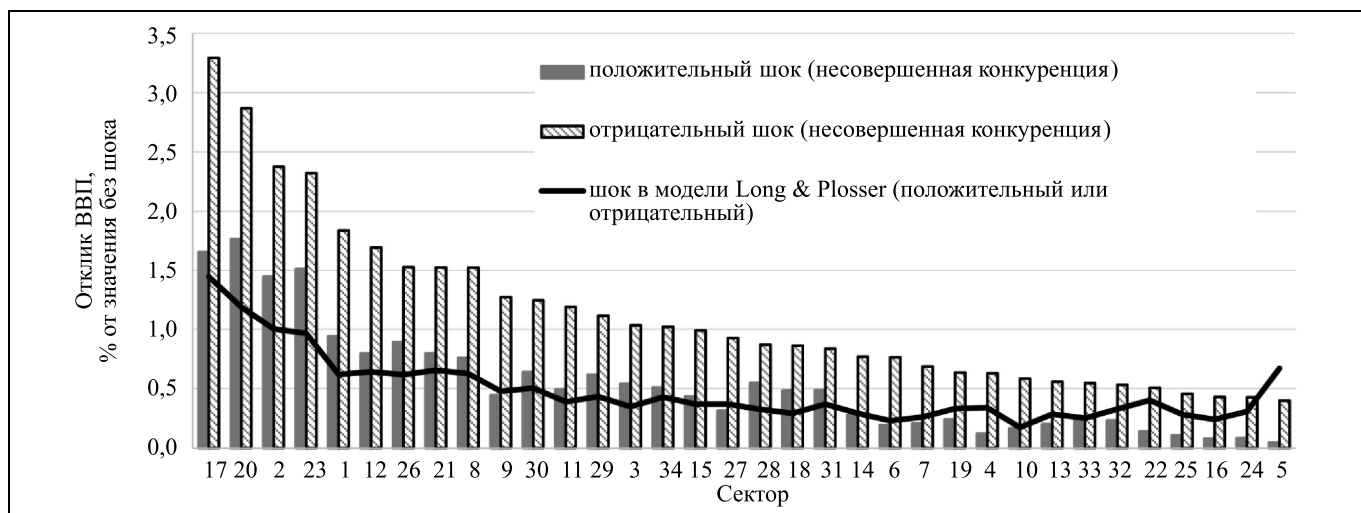


Рис. 2. Асимметрия откликов совокупного реального ВВП на положительные и отрицательные 5%-е шоки СФП разных секторов в много-секторной модели с несовершенной конкуренцией

и, как следствие, производитель i продаст не всю продукцию. Таким образом, данный эффект приводит к еще большему уменьшению продаж сектора i . Кроме того, поскольку продукция сектора i используется впоследствии другими секторами, их выпуск также уменьшается, что, в свою очередь, усиливается ценовыми эффектами, аналогичными описанному.

В случае положительного шока СФП сектора i подобный эффект не наблюдается, поскольку уменьшение цены до уровня ниже оптимального приводит к тому, что спрос на продукцию сектора i будет выше, чем предложение. Однако перепроизводства (противоположного по знаку описанной выше рецессии) в экономике возникнуть не может, так как объем продукции сектора i ограничен. Превышение спроса над предложением приведет к тому, что в следующих периодах цена вырастет до нового равновесного уровня.

Таким образом, отсутствие мгновенной подстройки цен усиливает краткосрочные последствия негативных шоков СФП, не оказывая существенного усиливающего влияния на последствия положительных шоков. В равновесных же моделях в каждом периоде цены подбираются так, чтобы спрос был равен предложению, вследствие чего описанные эффекты не наблюдаются.

Отметим, что, принимая во внимание описанные выше результаты работы [19], можно предположить, что применение в модели с несовершенной конкуренцией производственных функций CES вместо функций Кобба — Дугласа может увеличить описанную асимметрию.

Наблюдение, связанное с различием времен отклика на шоки разных знаков, также является общим для всех секторов. При этом для всех отрас-

лей, за исключением сектора 5 (Leather, Leather and Footwear), максимальное воздействие отрицательного шока предшествует отклику на положительный шок. Учитывая такую особенность системы, можно ожидать нетривиальную зависимость агрегированного отклика системы от временного паттерна, характеризующего возникновение положительных и отрицательных шоков.

3. ДИНАМИКА МАТРИЦЫ «ЗАТРАТЫ — ВЫПУСК» В МНОГОСЕКТОРНОЙ МОДЕЛИ С НЕСОВЕРШЕННОЙ КОНКУРЕНЦИЕЙ

Введем обозначения для матрицы $\mathbf{Z}$ «затраты — выпуск» в текущих ценах

$$\mathbf{Z}_t = \{Z_{ijt}\}_{i,j=1,\dots,N} \equiv \{P_{it}X_{ijt}\}_{i,j=1,\dots,N},$$

и нормированной по столбцу матрицы $\mathbf{G}$

$$\mathbf{G}_t = \{G_{ijt}\}_{i,j=1,\dots,N} \equiv \left\{ \frac{P_{it}X_{ijt}}{\sum_{k=1}^N P_{kt}X_{kjt}} \right\}_{i,j=1,\dots,N}.$$

Отметим, что реальные матрицы «затраты — выпуск» существенно эволюционируют во времени [22—23]. В частности, данный факт может быть проиллюстрирован динамикой L^1 -расстояния d между нормированными матрицами $(\mathbf{G}_t)$ «затраты — выпуск» разных лет (рис. 3), определяемого соотношением

$$d(\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2) = \max_j \sum_i |G_{ij1} - G_{ij2}|.$$



Рис. 3. Динамика L^1 -расстояния между нормированными матрицами «затраты — выпуск» России G_p (источник: расчеты авторов на основе данных WIOD (a) и ИНП РАН⁴ (б))

Для наглядности на рис. 3 приведена динамика как расстояния между матрицами «затраты — выпуск» в текущих ценах в классификации WIOD (рис. 3, a), так и в постоянных ценах в классификации ОКОНХ по данным Института народнохозяйственного прогнозирования (ИНП) РАН (рис. 3, б).

Принимая во внимание данный факт, важно отметить, что во всех известных авторам равновесных многосекторных моделях с совершенной конкуренцией действие шоков не приводит к изменению матрицы «затраты — выпуск», поскольку даже при наличии шоков соотношение между потоками промежуточного потребления определяется постоянными коэффициентами производственных функций. Как отмечается в работе [20], в рассматриваемой в ней модели с несовершенной конкуренцией в равновесии в отсутствие шоков элементы матрицы G_t также определяются постоянными коэффициентами производственных функций, что следует из условий первого порядка задачи максимизации прибыли:

$$X_{kit}P_{kt} = (1 - 1/\eta)(1 - \alpha)\gamma_{ki}Y_{it+1}P_{it+1}, \quad (1)$$

⁴ Данные расчетных межотраслевых балансов РФ за 1980—2006 гг. в классификации ОКОНХ в постоянных ценах взяты с сайта <http://www.macroforecast.ru/>.

приводящих к соотношению

$$G_{kit} \equiv \frac{X_{kit}P_{kt}}{\sum_{j \in S_i} X_{jit}P_{jt}} = \gamma_{ki}.$$

Однако, как отмечалось выше, технологические шоки секторов выводят систему из равновесия. В связи с этим, интерес представляет анализ обусловленной эффектами неравновесия динамики матрицы «затраты — выпуск», индуцированный технологическими шоками.

Обозначим $\hat{Y}_{it+1}$ и $\hat{P}_{it+1}$ плановые (или равновесные) значения выпуска и цен сектора i , полученные в результате решения задачи максимизации прибыли (на этапе 3 алгоритма принятия решений в модели [20]). Предположим, что до момента времени t система находилась в состоянии равновесия, т. е. фактические выпуск и цены производителей совпадали с плановыми. Кроме того, пусть в момент времени $t + 1$ сектор i испытывает негативный технологический шок λ_y ($A_{it+1} = \lambda_y A_{it}$) такой, что реальный выпуск Y_{it+1} оказывается меньше планового:

$$Y_{it+1} = \lambda_y \hat{Y}_{it+1}, \quad \lambda_y < 1.$$

Для предполагаемой в модели степенной субъективной функции спроса имеем соотношение

$Y_{it+1} \sim P_{it+1}^{-1/\eta}$, руководствуясь которым, производитель i изменит цену до уровня P_{it+1} , определяемого условием

$$P_{it+1} = \lambda_y^{-1/\eta} \hat{P}_{it+1} > \hat{P}_{it+1}. \quad (2)$$

Увеличение цены сектора i приводит к увеличению издержек остальных секторов. Поэтому плановые значения выпуска и цен на следующий период других секторов изменятся. Пусть $\hat{Y}_{jt+2}$ и $\hat{P}_{jt+2}$ — новые планы сектора j . Учитывая условия первого порядка в задаче максимизации прибыли, нетрудно показать, что изменение планового объема выручки сектора j составит (по сравнению со значением плана на тот же период в отсутствие шока)

$$\frac{\hat{Y}_{jt+2} \hat{P}_{jt+2}}{\hat{Y}_{jt+2} \hat{P}_{jt+2}} = \lambda_y^{\gamma_{ij}^v} < 1,$$

где $v = \frac{1-\alpha}{\eta - (\eta-1)(1 - \frac{\alpha}{\kappa+1})}$. Принимая во внима-

ние выражения (1) и (2), изменение планового объема закупок сектора j у сектора i составит

$$\frac{\hat{Y}_{ijt+1} P_{it+1}}{\hat{Y}_{ijt+1} \hat{P}_{it+1}} = \lambda_y^{\gamma_{ij}^v} \Rightarrow \frac{\hat{X}_{ijt+1}}{\hat{X}_{ijt+1}} = \lambda_y^{\gamma_{ij}^v + 1/\eta}.$$

В свою очередь, изменение планового объема закупок сектора j у сектора k , $k \neq i$, определяется соотношением

$$\frac{\hat{X}_{kjt+1} P_{kt+1}}{\hat{X}_{kjt+1} \hat{P}_{kt+1}} = \frac{\hat{X}_{kjt+1} \hat{P}_{kt+1}}{\hat{X}_{kjt+1} \hat{P}_{kt+1}} = \lambda_y^{\gamma_{ij}^v} \Rightarrow \frac{\hat{X}_{kjt+1}}{\hat{X}_{kjt+1}} = \lambda_y^{\gamma_{ij}^v}.$$

Если на рынке отсутствует дефицит продукции, то для любого сектора k планируемый объем закупок промежуточных факторов производства совпадает с фактическим и нормированная матрица «затраты — выпуск» не изменится:

$$\begin{aligned} G_{kjt+1} &= \frac{X_{kjt+1} P_{kt+1}}{\sum_{i=1}^N X_{ijt+1} P_{it+1}} = \frac{\hat{X}_{kjt+1} P_{kt+1}}{\sum_{i=1}^N \hat{X}_{ijt+1} P_{it+1}} = \\ &= \frac{\lambda_y^{\gamma_{ij}^v} \hat{X}_{kjt+1} \hat{P}_{kt+1}}{\lambda_y^{\gamma_{ij}^v} \sum_{i=1}^N \hat{X}_{ijt+1} \hat{P}_{it+1}} = \gamma_{kj}. \end{aligned}$$

Если же на рынке наблюдается дефицит, то реальный объем закупок фирм оказывается меньше планового. В результате оптимальное соотношение между затратами на разные факторы нарушается, а значит, меняются и потоки промежуточных товаров, характеризующие сеть «затраты — выпуск».

Покажем, что сразу после воздействия негативного шока СФП сектора i на рынке наблюдается дефицит продукции этого сектора. Совокупный спрос на продукцию сектора i в момент времени $t+1$ складывается из потребностей других секторов на продукцию этого сектора (плановое промежуточное потребление) и желаемого объема конечного потребления домашними хозяйствами:

$$\begin{aligned} D_{it+1} &= \sum_k \hat{X}_{ikt+1} + \sum_k \hat{C}_{ikt+1} = \\ &= \sum_k \lambda_y^{\gamma_{ij}^v + 1/\eta} \hat{X}_{ijt+1} + \sum_k \lambda_y^{1/\eta} \hat{C}_{ikt+1}, \end{aligned}$$

где $\hat{X}_{ikt+1}$ и $\hat{C}_{ikt+1}$ — значения желаемого потребления продукции сектора i домашним хозяйством k до и после воздействия шока соответственно. В последнем равенстве учтено, что изменение спроса на конечное потребление определяется изменением уровня цен⁵.

Совокупное предложение сектора i определяется объемом продукции, произведенной сектором:

$$Y_{it+1} = \lambda_y \hat{Y}_{it+1} = \lambda_y \left(\sum_k \hat{X}_{ikt+1} + \sum_k \hat{C}_{ikt+1} \right).$$

Учитывая, что поскольку при характерных значениях параметров модели справедливы неравенства $\gamma_{ij}^v + 1/\eta < 1$ и $1/\eta < 1$, то $D_{it+1} > Y_{it+1}$, т. е. на рынке наблюдается дефицит продукции сектора i . Из приведенных аргументов следует, что воздействие негативных и положительных шоков на структуру матрицы «затраты — выпуск» отличается. Так, отклик на негативные шоки наблюдается непосредственно после воздействия шока, тогда как воздействие положительных шоков СФП на структуру матрицы может быть отложенным (в силу отсутствия дефицита продукции на рынке сразу после воздействия шока).

Из правила проведения транзакций на товарном рынке (шаг 6 алгоритма, приведенного в работе [20]) следует, что при дефиците товаров происходит их пропорциональное распределение. Таким образом, верно следующее соотношение между

⁵ Данное утверждение следует из условий первого порядка в задаче максимизации полезности потребителя, а также неизменности дохода потребителя, полученного до момента времени $t+1$.

реальной стоимостью промежуточных факторов сектора i , приобретенных сектором j , и исходными плановыми (равновесными) расходами:

$$\frac{X_{ijt+1} P_{it+1}}{\hat{X}_{ijt+1} \hat{P}_{it+1}} = \lambda_D \lambda_y^{\gamma_{ij}^v},$$

$$\text{где } \lambda_D = \frac{\hat{Y}_{it+1}}{\sum_k \lambda_y^{\gamma_{ik}^v + 1/\eta} \hat{X}_{ikt+1} + \sum_k \lambda_y^{1/\eta} \hat{C}_{ijt+1}}.$$

Аналогичным образом нетрудно показать, что в момент времени $t + 1$ наблюдается профицит продукции всех секторов, кроме сектора i . Учитывая это, получаем соотношение, характеризующее изменение элементов нормированной матрицы «затраты — выпуск» в момент времени $t + 1$:

$$\frac{D_{ijt+1}}{D_{kjt+1}} = \frac{1}{\lambda_D} \frac{\gamma_{ij}}{\gamma_{kj}}. \quad (3)$$

Таким образом, соотношение (3) характеризует изменение матрицы «затраты — выпуск», вызванное шоком СФП одного из секторов. Динамика матрицы в последующие моменты времени представляет собой суперпозицию откликов такого рода на последующее отклонение выпуска остальных секторов.

Для оценки достаточности описанного модельного механизма генерации динамики матрицы «затраты — выпуск» для описания эволюции, наблюдаемой в данных (см. рис. 3), был проведен численный эксперимент, в котором исследовалась эволюция агрегированной по году (12-ти модельным тактам) матрицы в случае, когда технологические шоки описывались случайным процессом

$$A_{it} = A_{it-1} \exp(\varepsilon_{it}), \quad \varepsilon_{it} \sim \text{i.i.d. } \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2).$$

Для корректности сравнения результатов длительность наблюдения в модели была такой же, как объем доступных эмпирических данных (16 лет или 192 такта). Динамика L^1 -расстояния между исходной матрицей и матрицами последующих лет представлена на рис. 4. Из сравнения характерных расстояний в модели (среднее порядка 0,015) и реальных величин (см. рис. 3, все расстояния превышают 0,3) ясно, что вариативность реальных матриц существенно больше модельной. Кроме того, расстояние между матрицами в модели колеблется вокруг некоторого среднего, тогда так в реальных данных прослеживается явно выраженный тренд.

Таким образом, хотя обнаружение динамики матрицы «затраты — выпуск» в многосекторной модели с несовершенной конкуренцией и является существенным результатом, однако предьявлен-



Рис. 4. Динамика L^1 -расстояния между нормированными матрицами «затраты — выпуск» (G_t) и исходной матрицей (G_0) в модели

ного механизма недостаточно для описания наблюдаемой в данных эволюции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены особенности отклика многосекторной экономической системы на технологические шоки в рамках представленной в работе [20] динамической многосекторной модели несовершенной конкуренции на графе «затраты — выпуск». Неравновесность модели, а также механизмы, характерные для несовершенной конкуренции, приводят к тому, что отклик системы на технологические шоки одной амплитуды, но разных знаков оказывается разным. А именно, падение реального ВВП вследствие негативного шока оказывается более глубоким, чем подъем, следующий за положительным технологическим шоком. Кроме того, отклики на эти шоки имеют разные временные масштабы, поэтому целесообразно дальнейшее исследование зависимости отклика системы от характеристик случайного процесса, описывающего шоки, в частности, от временного паттерна их наступления.

Показано, что в рамках многосекторной модели с несовершенной конкуренцией один из результатов воздействия технологических шоков заключается в изменении структуры матрицы «затраты — выпуск». Однако это изменение мало по сравнению с наблюдаемой в данных вариативностью реальных матриц. Исходя из этого, необходимо дальнейшее исследование возможных механизмов эволюции матрицы «затраты — выпуск».

Авторы выражают признательность рецензентам и члену Редколлегии В.В. Ключкову за ценные замечания, позволившие существенно повысить качество работы.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Классификация WIOD

Номер сектора	Название
1	Agriculture, Hunting, Forestry and Fishing
2	Mining and Quarrying
3	Food, Beverages and Tobacco
4	Textiles and Textile Products
5	Leather, Leather and Footwear
6	Wood and Products of Wood and Cork
7	Pulp, Paper, Paper, Printing and Publishing
8	Coke, Refined Petroleum and Nuclear Fuel
9	Chemicals and Chemical Products
10	Rubber and Plastics
11	Other Non-Metallic Mineral
12	Basic Metals and Fabricated Metal
13	Machinery, Nec
14	Electrical and Optical Equipment
15	Transport Equipment
16	Manufacturing, Nec; Recycling
17	Electricity, Gas and Water Supply
18	Construction
19	Sale, Maintenance and Repair of Motor Vehicles and Motorcycles; Retail Sale of Fuel
20	Wholesale Trade and Commission Trade, Except of Motor Vehicles and Motorcycles
21	Retail Trade, Except of Motor Vehicles and Motorcycles; Repair of Household Goods
22	Hotels and Restaurants
23	Inland Transport
24	Water Transport
25	Air Transport
26	Other Supporting and Auxiliary Transport Activities; Activities of Travel Agencies
27	Post and Telecommunications
28	Financial Intermediation
29	Real Estate Activities
30	Renting of M&Eq and Other Business Activities
31	Public Admin and Defence; Compulsory Social Security
32	Education
33	Health and Social Work
34	Other Community, Social and Personal Services

ЛИТЕРАТУРА

1. *Input-output economics* / ed. by W. Leontief. — Oxford: Oxford University Press, 1986.
2. *Коссов В.В.* Межотраслевой баланс. — М.: Экономика, 1966. — 223 с.
3. *Михалевский Б.Н.* Система моделей среднесрочного народнохозяйственного планирования: Принцип, обзор, описание верхнего уровня народнохозяйственного планирования. — М.: Наука, 1972. — 475 с.
4. *Исаев Б.Л.* Балансы межотраслевых финансовых связей. — М.: Наука, 1973. — 280 с.
5. *Гранберг А.Г.* Математические модели социалистической экономики. — М.: Экономика, 1978. — 351 с.
6. *Lucas R.E.* Understanding business cycles // *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*. — 1977. — Vol. 5, N 1. — P. 7—29.

7. *Hulten C.R.* Growth Accounting with Intermediate Inputs // *Rev. Econ. Stud.* — 1978. — Vol. 45. — P. 511—518.
8. *Aggregate Fluctuations from Independent Sectorial Shocks: Self-Organized Criticality in a Model of Production and Inventory Dynamics* / P. Bak, et al. // *Ricerche Economiche*. — 1993. — Vol. 47. — P. 3—30.
9. *Credit chains and bankruptcy propagation in production networks* / S. Battiston, et al. // *Journal of Economic Dynamics and Control*. — 2007. — Vol. 31, N 6. — P. 2061—2084.
10. *Carvalho V.M.* Aggregate Fluctuations and the Network Structure of Intersectoral Trade // *Working Papers* (Universitat Pompeu Fabra. Departament de Economia y Empresa). — 2009. — N 1206. — 58 p.
11. *Foerster A.T., Sarte P.-D.G., Watson M.W.* Sectoral versus Aggregate Shocks: A Structural Factor Analysis of Industrial Production // *The Journal of Political Economy*. — 2011. — Vol. 119, N 1. — P. 1—38.
12. *The Network Origins of Aggregate Fluctuations* / D. Acemoglu, et al. // *Econometrica*. — 2012. — Vol. 80, N 5. — P. 1977—2016.
13. *Carvalho V.M.* A survey paper on recent developments of input-output analysis // *Complexity Research Initiative for Systemic Instabilities*. — 2013. — 40 p.
14. *Baqee D.R.* Cascading Failures in Production Networks // *Econometrica*. — 2018. — Vol. 86, N 5. — P. 1819—1838.
15. *Long J.B.J., Plosser C.I.* Real Business Cycles // *Journal of Political Economy*. — 1983. — Vol. 9, N 1 (1). — P. 39—69.
16. *Dupor B.* Aggregation and irrelevance in multi-sector models // *Journal of Monetary Economics*. — 1999. — Vol. 43, N 2. — P. 391—409.
17. *Horvath M.* Sectoral shocks and aggregate fluctuations // *Journal of Monetary Economics*. — 2000. — Vol. 45, N 1. — P. 69—106.
18. *Gabaix X.* The GRANULAR Origins of Aggregate Fluctuations // *Econometrica*. — 2011. — Vol. 79, N 3. — P. 733—772.
19. *Baqee D.R., Farhi E.* The Macroeconomic Impact of Microeconomic Shocks: Beyond Hulten's Theorem // *NBER Working Papers*. — 2017. — N 23145. — P. 1—75.
20. *Леонидов А.В., Серебрянникова Е.Е.* Динамическая модель несовершенной конкуренции в многосекторной экономике // *Проблемы управления*. — 2017. — Т. 4. — С. 8—16.
21. *Leonidov A., Serebryannikova E.* Dynamical Topology of Highly Aggregated Input-Output Networks // *Working Paper*. — 2018. — URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3117605 (дата обращения: 06.09.2018).
22. *Ершов Э.Б.* Развитие и реализация идей модели межотраслевых взаимодействий для российской экономики // *Экономический журнал Высшей школы экономики*. — 2008. — Т. 12, № 1.
23. *Foerster A., Choi J.* The Changing Input-Output Network Structure of the U.S. Economy. — Fed. Reserv. Bank Kansas City. *Econ. Rev.* — 2017. — P. 23—49.
24. *Benassy J.-P.* The Disequilibrium Approach to Monopolistic Price Setting and General Monopolistic Equilibrium // *The Review of Economic Studies*. — 1976. — Vol. 43, iss. 1. — P. 69—81.
25. *Benassy J.-P.* The Macroeconomics of Imperfect Competition and Nonclearing Markets. A Dynamic General Equilibrium Approach. — MIT Press, 2002. — P. 272.

Статья представлена к публикации членом редколлегии В.В. Клочковым.

Леонидов Андрей Владимирович — д-р физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва; профессор, Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, leonidov@lpi.ru,

Серебрянникова Екатерина Евгеньевна — мл. науч. сотрудник, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва; аспирант, Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, serebryannikova@lpi.ru.

Поступила в редакцию 06.09.2018, после доработки 27.11.2018.
Принята к публикации 12.12.2018.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ТЕМАТИЧЕСКИ ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕКСТОВ С ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИМ СЛОВАРЕМ В ФОРМАТЕ РЕГУЛЯРНЫХ ВЫРАЖЕНИЙ¹

В.С. Суховеров

Разработана система автоматической обработки текстов, оценивающая тематику текста по его терминологии, которая задается словарем терминов. Предложено и обосновано применение регулярных выражений в предметно ориентированных словарях, используемых в программах анализа текста на естественных языках. Отмечена и описана взаимосвязь регулярных выражений и конечных автоматов через регулярные множества. Предложена количественная оценка тематической направленности исследуемого текста — профиль документа, вычисляемый по результатам поиска терминов. Система реализована в виде программного комплекса с вариантом словаря для выбранной предметной области — теории управления и ее приложений. Система протестирована на архиве журнала «Автоматика и телемеханика». Получены профили тематической направленности статей, взятых из различных рубрик журнала. Указаны возможности развития системы.

Ключевые слова: термин, словарь предметной области, регулярное выражение, конечный автомат, профиль документа, программный комплекс.

ВВЕДЕНИЕ

Потребность в регулярных выражениях [1] возникла при создании системы автоматического анализа тематики русскоязычных текстов, принадлежащих определенной предметной области. Задача определения тематики научного текста, его принадлежности к тем или иным разделам определенной прикладной области вполне актуальна и востребована. Она зачастую является составной частью таких информационных задач, как классификация и рубрикация, а также задач управления, связанных с принятием решений: подбор научных сотрудников для выполнения проекта, распределение тематических заданий в редакциях научных журналов и др. Анализируя тексты научных публикаций специалистов, можно оценить их

компетентность или их соответствие компетенциям, предъявляемым для участия в определенном проекте.

Предлагаемый подход ограничивается тематической оценкой текста и не анализирует качество документа (новизну, актуальность, грамотность изложения и т. д.), поэтому предполагает участие эксперта на стадии принятия решения. Эти вопросы обсуждались в предыдущей работе [2].

В настоящей работе излагается подход к построению механизма автоматической обработки текста и основных его составляющих: программы поиска и словаря предметной области, а также подход к организации их совместной работы. Определение тематики научного текста можно представить как совокупность двух задач:

- отыскание в тексте всех возможных словоформ терминов из словаря предметной области;
- тематическая классификация найденных терминов и количественная оценка тематических составляющих.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 18-07-01044а).

Основное требование к программе поиска терминов в тексте документа — это точность и полнота результата. Программа должна найти в тексте все возможные словоформы терминов из словаря предметной области и только их, если таковые содержатся в документе. Известно множество готовых программных средств для анализа текстов на естественных языках: стеммер Портера, AOT (автоматическая обработка текста) [3], *mystem* [4] (морфологический анализатор русскоязычных текстов), *pyMorphu* [5] (на основе словарей и идей AOT) и др. Стеммер Портера находит слово по его неизменяемой части и является наиболее простым и широко применяемым средством, как правило, в различных комбинациях с дополнительными алгоритмами морфологического, синтаксического и семантического анализа. Из числа полнофункциональных программных систем отметим AOT, которая выполняет полный анализ текста, охватывая все уровни представления: графематический, морфологический, синтаксический и семантический. Но сложность и объемность этой системы препятствует ее адаптации для решения других задач. Перечисленные примеры программных средств в настоящей работе не применялись.

1. О СИСТЕМЕ В ЦЕЛОМ

В системе можно выделить две основные функциональные составляющие: словарь предметной области и программу поиска терминов. Автономный словарь представляет собой книгу Excel. Тематика словаря должна соответствовать предметной области, в которой работает система. Замена словаря предметной области не требует изменения программного обеспечения. Словарь базируется на онтологии [6] предметной области. В данном случае был составлен и использовался словарь терминов теории управления. Онтологический подход к описанию предметной области подробно изложен в работе [2]. В словаре структура связей дерева онтологии преобразована в рубрикатор. Терминологическая информация словаря представлена в формате регулярных выражений. Регулярные выражения в предлагаемом подходе служат наиболее подходящей моделью для записи терминов словаря, так как удовлетворяют требованиям точного и полного описания терминов. Применение регулярных выражений существенно упростило задачу поиска терминов в тексте анализируемого документа, поскольку ряд языков программирования содержит библиотеки для работы с регулярными выражениями. В окончательном виде словарь предметной области представляет собой книгу Excel, содержащую табличные представления рубрикатора и терминологии в формате ре-

гулярных выражений. Программа поиска кроме стандартных библиотек Python, содержит ряд сторонних программных пакетов, предназначенных для работы с регулярными выражениями. Программа поиска встроена в программный комплекс [7], который помимо нее содержит программный интерфейс для работы со словарем терминов, программу для расчета профиля документа или совокупности документов и экранный интерфейс пользователя.

2. СЛОВАРЬ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ

Термины предметной области отбирались из материалов архива журнала «Автоматика и телемеханика». Структура онтологического дерева (рис. 1) выстраивалась параллельно с распределением отобранных терминов по темам. В результате определилось дерево онтологии, которое имеет три выраженные ветви: «фундаментальные теории», «прикладные теории и проблемные области», «область приложений». Термины в основном сосредоточены в листьях дерева графа предметной области. При таком наполнении онтологии мы получаем наиболее дифференцированную информацию о тематической направленности текста. Дополнительно можно отметить, что при создании онтологии использовались далеко не все возможности пакета Protégé-OWL [8, 9], относящиеся к построению аксиоматики, определению свойств и взаимоотношений классов и экземпляров и др. Это объясняется тем, что в рассматриваемом случае структура онтологии достаточно простая. Связи классов онтологии «тема — подтема» интерпретируются как «класс — подкласс» с отношением «is — a». При этом классы онтологии содержат экземпляры одного типа (термины), которые обладают лишь одним признаком — принадлежностью теме. Его значение изменяется в пределах от 0 до 1 и зависит от числа тем, которым принадлежит термин. Термины могут быть однословными и многословными. При наполнении словаря важно было не включать в качестве самостоятельных однословных терминов широко распространенные в научной и научно-технической литературе слова, такие как «алгоритм», «задача», «цикл». Они вошли в состав многословных терминов, специфических для определенных тем: «генетический алгоритм», «задача коммивояжера», «гамильтонов цикл». Для удобства применения в системе поиска терминов информация онтологии предметной области преобразована в формат книги Excel, которая содержит таблицу-рубрикатор тем онтологии и таблицу-словарь терминов предметной области, а также служит для отображения результатов обра-

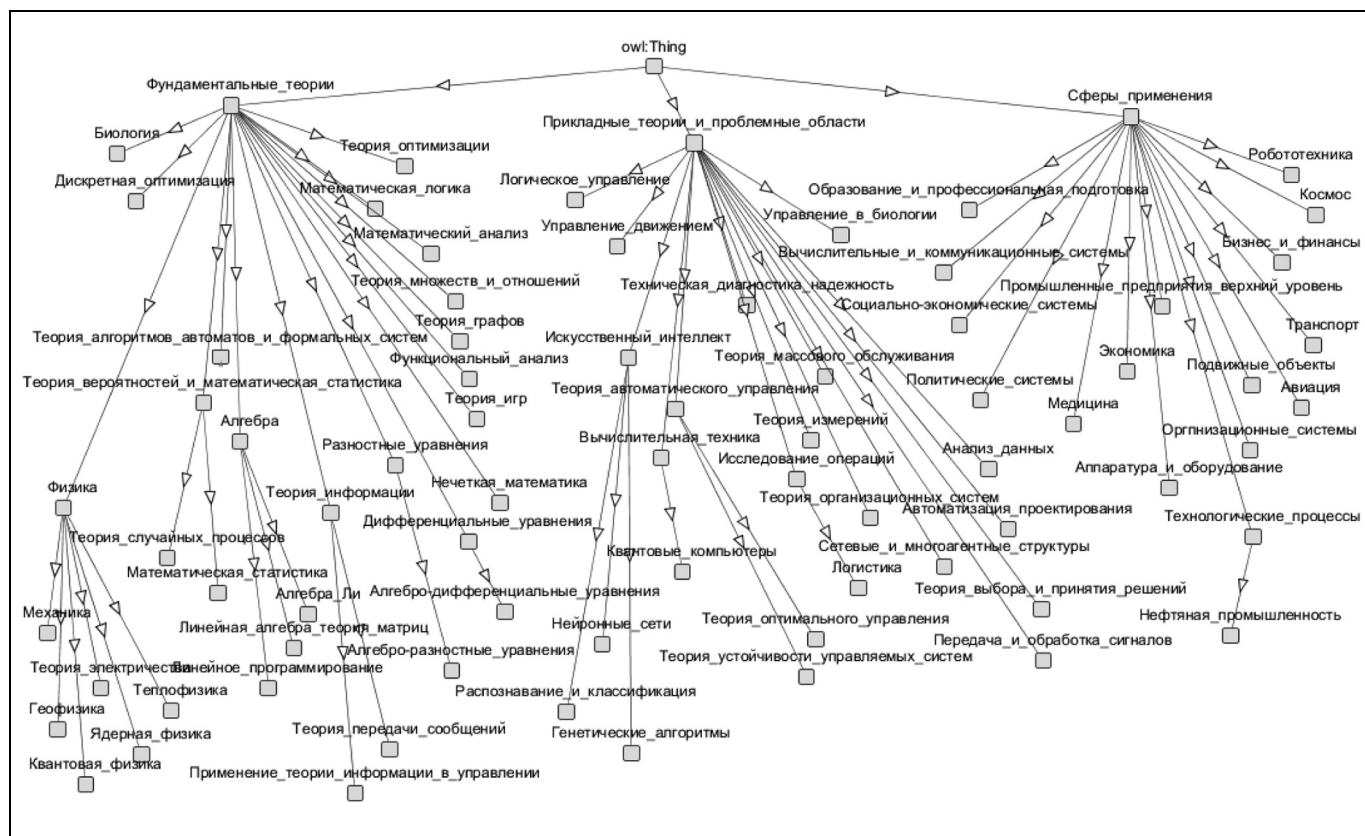


Рис. 1. Дерево онтологии предметной области

ботки текстов, получаемых при работе системы, например, графических построений по результатам тестирования системы. Текущая версия словаря онтологии не обеспечивает полноты терминов и списка тем: они будут постоянно расширяться в ходе эксплуатации и по мере привлечения специалистов в данной области знаний. Естественно, научные направления непрерывно развиваются, появляются новые теории и области приложений. Это приводит к расширению и уточнению терминологии. Поэтому и словарь, и онтология должны быть постоянно открытыми для расширения и модификации.

В электронных общелексических словарях с большими объемами информации первоочередная задача состоит в упорядочении информации и применении алгоритмов поиска с наименьшими ожидаемыми либо гарантированными временными затратами, например, применение модели на конечных автоматах с применением алгоритма Томпсона [10]. Специфика рассматриваемой задачи состоит в том, что словарь терминов предметной области несравнимо меньше по объему общелексического словаря. Даже при включении в него, кроме однословных и многословных терминов,

еще и характерных контекстных оборотов объем словаря вряд ли превысит 10^4 единиц. Поэтому в данном случае при разработке программы поиска не было жестких требований ни к скорости поиска, ни к объему оперативной памяти. Отметим, что задача объединения терминологической части словаря в единую морфосинтаксическую структуру не ставилась. Важно было найти такую модель представления терминов, которая бы явилась самодостаточной, т. е. не требующей дополнительных средств анализа текста при определении терминов предметной области. Оказалось, что это можно сделать с помощью регулярных выражений, причем для каждого термина (однословного или многословного) все его возможные словоформы можно объединить в одно регулярное выражение.

3. РЕГУЛЯРНЫЕ ВЫРАЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ПОИСКА ТЕРМИНОВ

Исходя из строковых представлений, регулярные выражения можно рассматривать как искусственный формальный язык, в котором существует два типа символов: литералы и метасимволы (или управляющие символы). Из литералов фор-

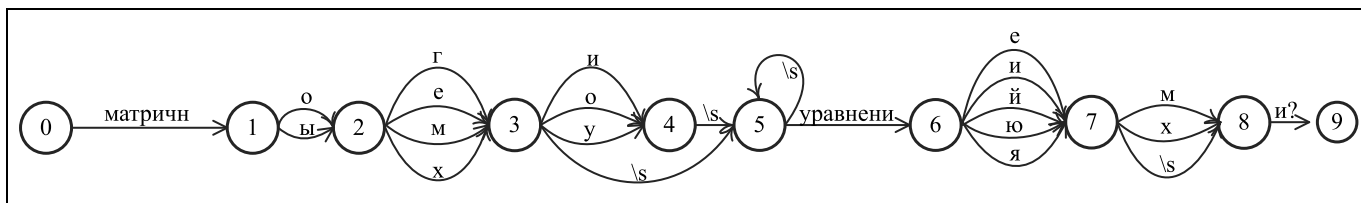


Рис. 2. Регулярное выражение в интерпретации конечного автомата со сжатием ключей на дугах $0 \rightarrow 1$ и $5 \rightarrow 6$

мируются слова текста, а метасимволы выполняют функции грамматических элементов. Набор метасимволов в регулярных выражениях обладает большими выразительными возможностями. Слова, объединенные по определенным правилам с грамматическими элементами, образуют структурированные конструкции, способные компактно выразить все возможные словоформы словосочетаний, включая однословные и многословные термины, а также характерные для данной предметной области контекстные обороты. Рассмотрим пример двусловного термина.

Пример: матричное уравнение. Регулярное выражение, объединяющее все словоформы этого термина, имеет вид:

((матричн)([оы][гемх][иоу\s])(\s{1,2})(уравнени)([ейийоя][мх\s]и?)) ♦

Из примера видно, что регулярные выражения представляют собой строки, структурированные с помощью управляющих символов. Автором регулярных выражений является математик Стивен Коул Клини (*Stephen Cole Kleene*). Он дал формальное описание этих моделей при помощи алгебры регулярных множеств. Теорема Клини доказывает, что для каждого регулярного выражения R может быть построен конечный автомат (возможно, недетерминированный), распознающий язык, задаваемый выражением R . Другими словами: классы регулярных множеств и автоматных языков совпадают. В рассматриваемой ситуации каждое регулярное выражение, представляющее, в общем случае, многословный термин, является элементом регулярного множества (словаря терминов предметной области), построенного на алфавите языка регулярных выражений, и в этом случае в программе поиска можно ограничиться применением парсера. При этом каждую конструкцию термина в виде регулярного выражения можно представить и как конечный автомат со сжатием. В данном случае каждый такой конечный автомат, представляющий термин, имеет один вход и один выход.

Для работы с регулярными выражениями разработаны не только алгоритмы, но и, в ряде языков программирования, библиотеки методов для выполнения различных операций и, в первую оче-

редь, поиска. Для удобства применения регулярных выражений в программе поиска термины онтологии были представлены в словаре двояко: а) в лемматизированной или «нормальной» форме (существительные — именительный падеж, единственное число; прилагательные — именительный падеж, единственное число, мужской род; глаголы, причастия, деепричастия — глагол в инфинитиве); б) в виде регулярных выражений. Между представлениями а) и б) установлено взаимно-однозначное соответствие. Такой подход обеспечивает применение в программе поиска регулярных выражений, поскольку лемматизированная форма не охватывает все словоформы терминов и ее применение требует дополнительного морфологического и синтаксического разбора текстовых фрагментов. Если возникнет ситуация, предполагающая серьезное увеличение объема словаря, то применение регулярных выражений обладает определенной перспективой, а именно, возможностью перехода на более быстрые алгоритмы поиска, построенные на конечных автоматах (рис. 2), например, алгоритм Томпсона. Преимущества этого алгоритма по сравнению с бэктрекингом изложены в работе [11].

4. ОЦЕНКА ТЕМАТИЧЕСКОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ТЕКСТА

Для количественной оценки релевантности документа темам предметной области в систему введен профиль документа [2], который вычисляется по результатам поиска терминов. Пусть в документе D найдено K_D вхождений терминов, принадлежащих онтологии, содержащей N тем; темы и термины пронумерованы. Определим значимость термина для темы. Под значимостью i -го термина для j -й темы будем понимать величину s_j^i , такую, что:

$s_j^i = 1/c_j$, если i -й термин принадлежит j -й теме и c_i — число тем, которым принадлежит i -й термин;

$s_j^i = 0$, если i -й термин не принадлежит j -й теме.

Таким образом, принадлежность термина нескольким темам уменьшает вероятность его при-

надлежности каждой из них. Значимость всех найденных терминов K_D для j -й темы:

$$S_j = \sum_{i=1}^{K_D} s_j^i.$$

Суммарная значимость всех найденных терминов документа D по всем темам онтологии:

$$S_D = \sum_{j=1}^N S_j.$$

Релевантность $R_j(D)$ документа D j -й теме определяется как сумма значимостей всех терминов j -й темы, нормированная по S_D :

$$R_j(D) = S_j / S_D.$$

При таком нормировании сумма релевантностей документа всегда равна 1.

В результате, профиль документа можно определить как вектор релевантностей в пространстве тем онтологии: $\overline{P(D)} = (R_1(D), R_2(D), \dots, R_N(D))$.

5. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС. ТЕСТИРОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

Разработанный программный комплекс [12] предназначен для автоматического определения тематической принадлежности документов к определенной предметной области. Он выполняет предварительную обработку входного документа, а затем производит поиск в тексте документа терминов, однословных и многословных, принадлежащих словарю предметной области, строит профиль документа и выводит результат на экран, в файл или на печать. Документы должны быть представлены файлами в форматах TXT или PDF.

Программный комплекс написан на языке *Python* [13]. Для работы с регулярными выражениями в арсенале языка *Python* имеется мощная библиотека, которая позволяет компилировать регулярные выражения в объекты шаблонов и содержит методы для различных операций с ними, таких как поиск вхождения шаблона или выполнение замены строки. В разработке использовались и дополнительные пакеты программных модулей, в частности, пакет *pdfminer* для работы с файлами формата PDF.

Программный комплекс содержит: основную программу, выполняющую в автоматическом режиме поиск терминов в тексте документа и вычисление профиля документа (рис. 3); экранный интерфейс пользователя; словарь предметной области (книгу Excel) и программный интерфейс для работы с ним.

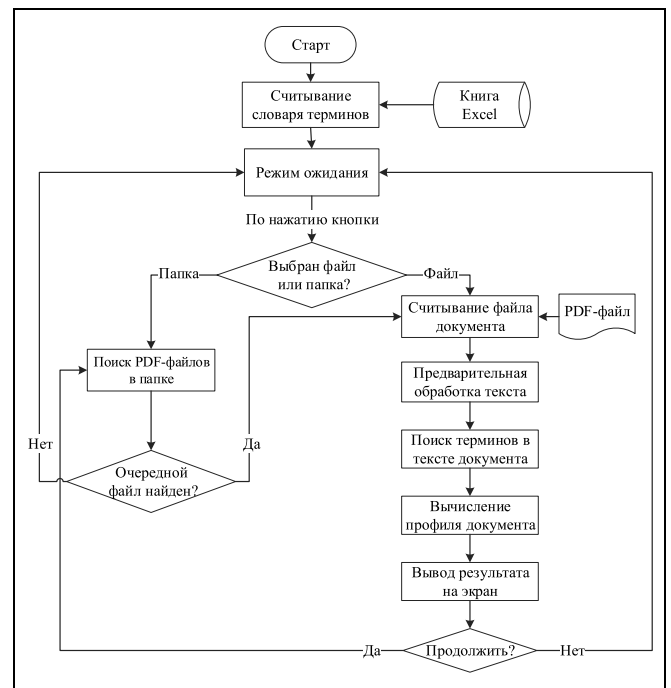


Рис. 3. Структурная схема программы автоматического определения профиля документа

Главное окно экранного интерфейса содержит кнопки управления обработкой файлов и панель для вывода результатов. Кроме главного окна, в состав интерфейса входит несколько диалоговых окон, обеспечивающих выбор режимов работы программного комплекса.

Тестирование проводилось на файлах текстового формата. Протестированы две рубрики из архива журнала «Автоматика и телемеханика» — «Системы массового обслуживания» и «Теория линейных систем». Результаты тестирования и их графическая интерпретация приведены в работе [10]. Еще один вариант тестирования на материалах архива журнала «Автоматика и телемеханика» проведен для членов редколлегии этого журнала. Тест заключался в сопоставлении сведений о научных интересах, представленных тестируемыми членами редколлегии, с профилем научных интересов, полученным системой автоматически по совокупности их публикаций в журнале «Автоматика и телемеханика».

Один из примеров.

Представлено членом редколлегии:

стохастическое программирование, стохастическое управление, стохастическое оценивание, минимаксная оптимизация, теория нечетких множеств, дискретная оптимизация, двухуровневое программирование, приложения теории оптимизации к аэрокосмическим системам и к финансовой математике, построение системы дистанционного обучения.

Получено с помощью системы автоматической обработки:

линейная алгебра, теория матриц 0,3 %;
линейное программирование 3,6 %;
дифференциальные уравнения 0,8 %;
дискретная оптимизация 2,9 %;
математический анализ 0,6 %;
функциональный анализ 0,9 %;
теория алгоритмов 0,3 %;
теория вероятностей и математическая статистика 29,7 %;
математическая статистика 1,6 %;
теория графов 1,0 %;
теория игр 12,3 %;
теория информации 0,1 %;
теория множеств и отношений 2,5 %;
теория оптимизации 1,3 %;
механика 2,5 %;
биология 0,1 %;
вычислительная техника и программирование 0,2 %;
искусственный интеллект 1,1 %;
генетические алгоритмы 0,0 %;
распознавание и классификация 0,1 %;
исследование операций 2,7 %;
передача и обработка сигналов 0,1 %;
теория автоматического управления 13,0 %;
теория устойчивости управляемых систем 0,1 %;
теория оптимального управления 11,5 %;
теория выбора и принятия решений 1,7 %;
теория массового обслуживания 1,4 %;
техническая диагностика, надежность 1,8 %;
управление движением 0,2 %;
авиация 0,1 %;
бизнес и финансы 4,6 %;
экономика 0,5 %.

Всего найдено терминов в файлах: 1492.

Соответствие полученных оценок научным интересам членов редколлегии следует воспринимать как ориентировочное и приблизительное по нескольким причинам. Одна из них — неполные списки публикаций, поскольку авторы публикуются, как правило, не в одном периодическом издании. Существуют и другие причины — это неполнота онтологии и неравномерное наполнение классов онтологии терминами. И если неполнота онтологии устраняется благодаря пополнению словаря экспертами, то неравномерность наполнения классов — это естественное явление, обусловленное тем, что различным тематикам соответствует разное количество характерных терминов. Это обстоятельство будет учтено в дальнейшем, оно предполагает ввод дополнительных весовых коэффициентов для значений значимости терминов при вычислении профиля документа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная система показала целесообразность применения регулярных выражений в качестве терминов, составляющих словарь предметной

области. Как было отмечено ранее, замена словаря предметной области не требует изменения программного обеспечения. Это означает, что система допускает возможность применения словарей на иностранных языках. В настоящее время система развивается. Ряд дальнейших усовершенствований системы был перечислен в работе [2]. Разрабатывается сетевой вариант системы для работы с сайтом ИПУ РАН, где размещены электронные копии научных публикаций (монографий, статей, докладов и т. д.) сотрудников и аннотации этих публикаций. Реализована и опробована предварительная версия сетевого варианта системы, работающая с файлами аннотаций докладов и публикаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридл Дж. Регулярные выражения. Пер. с англ. — 3-е изд. — СПб.: Символ-Плюс, 2008.
2. Кузнецов О.П., Суховеров В.С. Онтологический подход к оценке тематики научного текста // Онтология проектирования. — 2016. — Т. 6, № 1 (19) — С. 55–66.
3. Автоматическая обработка текста / Технологии. — URL: <http://aot.ru/technology.html> (дата обращения 20.09.2018).
4. Mystem. — URL: <https://nlp.ru/Mystem> (дата обращения: 20.09.2018).
5. Морфологический анализатор pymorphy2. — URL: <https://pymorphy2.readthedocs.io/en/latest/> (дата обращения: 20.09.2018).
6. Кузнецов О.П., Суховеров В.С., Шипилина Л.Б. Онтология как систематизация научных знаний: структура, семантика, задачи. — М.: ИПУ РАН, 2010. — С. 126–138.
7. Суховеров В.С. Оценка тематики научного текста на основе онтологического описания предметной области, практика применения // Сб. науч. тр. XX юбилейной Российской науч. конф. «Инжиниринг предприятий и управление знаниями» (ИП & УЗ—2017, Москва). — М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова, 2017. — Т. 1. — С. 187–193.
8. Smith M.K., Welty C., McGuinness D.L. OWL Web Ontology Language Guide, 2004. — URL: https://www.researchgate.net/publication/228057927_OWL_Web_Ontology_Language_Guide (дата обращения: 24.12.2018).
9. Horridge M. A Practical Guide to Building OWL Ontologies Using Protégé 4 and CO-ODE Tools. — The University of Manchester, 2011.
10. Thompson K. Programming Techniques: Regular expression search algorithm // Communications of the ACM. — 1968. — Vol. 11, iss. 6. — P. 419–422.
11. Cox R. Regular Expression Matching Can Be Simple And Fast (but is slow in Java, Perl, PHP, Python, Ruby, ...). — January 2007. — URL: <https://swtch.com/~rsc/regexp/regexp1.html> (дата обращения: 20.09.2018).
12. Суховеров В.С. Программный комплекс для автоматического определения профиля документов, относящихся к определенной предметной области: Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2018615473 РФ. Зарег. 08.05.2018.
13. Бизли Д. Python. Подробный справочник: пер. с англ. — СПб.: Символ-Плюс, 2010.

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

Суховеров Виктор Степанович — канд. техн. наук, науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, ✉ vicst09@yandex.ru.

Поступила в редакцию 27.09.2018, после доработки 22.10.2018.

Принята к публикации 12.12.2018.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПЕРАЦИОННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ КОМПЛЕКСОМ

Д.С. Кузнецов, С.А. Котеленко, В.Е. Пятецкий

Рассмотрены подходы к построению графовой операционной модели управления производственным комплексом. Предложена графовая модель, состоящая из множества кластеров, в частности, ресурсного кластера, кластера материалов и кластера производственного календаря. Показано, что предложенная модель может применяться для решения таких задач планирования, как построение основного графика плана потребности в материалах и мощности. Отмечено, что главные достоинства новой модели — открытость для дальнейших изменений, возможность применения алгоритмов на графах для решения оптимизационных задач, совместимость с современными графовыми базами данных, возможность прямой работы с ней специалистов по оптимизации бизнеса.

Ключевые слова: производственное планирование, планирование потребности в материалах и мощности, интегральное планирование, графовая операционная модель.

ВВЕДЕНИЕ

Современное металлургическое производство характеризуется сложной конфигурацией производственного оборудования, широким сортаментом выпускаемой продукции и постоянно меняющимися требованиями рынка. Сложная конфигурация оборудования и динамически меняющийся спрос характеризуются большим количеством стохастических процессов, которые влияют на эффективность управления производством и, в частности, на решение задачи интегрального планирования производства. Масштабы такого производства, в свою очередь, характеризуются несколькими тысячами сбытовых заказов в год, десятками тысяч номенклатурных позиций, сотнями поставщиков, широкой вариабельностью технологических маршрутов, применением динамических бизнес-моделей.

Большинство современных моделей управления производством [1] строится на платформе, реализующей реляционную модель данных. Такой подход имеет существенные недостатки при представлении данных со сложной иерархической структурой, каковыми и являются операционные модели. В рамках реляционной модели моделирование данных возможно лишь с помощью плоских отношений таблиц, при этом все отношения принадле-

жат одному уровню. Данное обстоятельство не позволяет вводить в модель множество значимых связей между данными либо такие связи реализуются на уровне приложений. Как результат, современные операционные модели управления производством, реализованные в рамках реляционного подхода, чрезмерно сложны, что оказывает непосредственное влияние на производительность, поскольку иерархическая структура данных модели управления производством оказывается распределенной среди множества таблиц и для извлечения данных требуется выполнять большое количество операций соединения. Кроме того, сопровождение и поддержка подобных моделей вызывают сложности и требуют специальных приложений.

Предложенные в работах [2—4] графовые операционные модели либо строятся исходя из модифицированной модели направленного асинхронного графа, либо являются развитием онтологических моделей с вводимой семантикой [3—5, 8]. В данной статье предлагается графовая операционная модель управления производственным комплексом [9], которая позволяет учесть особенности производства и может применяться для решения многоуровневых задач интегрального планирования производства. Особенность предлагаемого подхода состоит в возможности применения принципов семантической сети как для построения моде-

ли, так и для анализа и последующей обработки данных, при этом семантический анализ сочетается с возможностью применения графовых алгоритмов поиска и обнаружения кратчайшего пути.

Под управлением производственным комплексом понимаются разработка интегрального производственного плана и его выполнение с учетом своевременного реагирования на возникающие производственные сбои и изменяющиеся условия спроса.

Операционную модель предлагается строить в несколько этапов:

- эмпирическое агрегирование операций, составляющих производственные процессы;
- верификация отношений между отдельными процессами;
- формирование параметров операций и определение временных характеристик;
- описание модели на основе теории графов;
- введение семантики в графовую модель.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо разработать графовую модель интегрированного производственного планирования для решения задачи построения планов и графиков производства, а также графиков изменения запасов для того чтобы минимизировать суммарную себестоимость производства на заданном горизонте планирования и обеспечить равномерную загрузку производственных агрегатов (ресурсов).

Рассматриваемая модель должна согласовываться с более общими моделями, используемыми в настоящее время для решения задач управления цепочками поставок (Supply Chain Management — SCM, или управления запасами) [1, 10], так как рассматриваемая в данной статье задача представляет собой частный случай построения модели SCM.

Рассмотрим формирование целевой функции интегрального планирования.

Пусть x_i — неотрицательное производство (выпуск) в период i , y_i — запасы на конец периода i , s_i — заданный спрос на отдельно взятый продукт в период i , $c_i(z)$ — затраты на производство $z \geq 0$ единиц продукции в период i , $h_i(z)$ — затраты на хранение $z \geq 0$ единиц продукции в период i , $i = 1, \dots, n$. Предположим без потери общности, что $c_i(z) = h_i(z) = 0$ для всех i .

Задача состоит в том, чтобы выбрать производственный и ресурсный графики так, чтобы минимизировать затраты n -го периода

$$C(x, y) = \sum_{i=1}^n [c_i(x_i) + h_i(y_i)] \quad (1)$$

с учетом ограничения сохранения запасов

$$x_i + y_{i-1} - y_i = s_i, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

и неотрицательности производства и запасов (последнее — чтобы гарантировать удовлетворение требований по мере их возникновения, без предварительных заказов)

$$x, y \geq 0, \quad (3)$$

где для простоты установим $x_0 \equiv y_n \equiv 0$.

Целевая функция и ограничения в задаче (1)–(3) могут быть представлены в виде графовой модели (рис. 1) [1], где x — необходимый объем производства продукта, y — объем запаса продукта j на конец периода, s — заданный спрос на продукт j . Направленный граф (см. рис. 1) иллюстрирует общую задачу, решаемую производственным планированием, — минимизацию себестоимости продукции в каждом периоде. Данная модель также вводит понятие материального потока как движения материалов по переделам производства. Следует учитывать, что в данном случае под спросом понимается так называемый внутренний спрос, который определяет потребность в материалах на каждом переделе производства. Однако данная модель является предельно общей и требует последовательного усложнения. Кроме того, важнейшим параметром операционной модели должен быть горизонт планирования производства. Ряд характеристик объектов модели существуют только в заданном интервале (горизонте) планирования.

Представление модели в виде графа позволяет воспользоваться классической теорией графов для решения ряда задач управления. Однако в предлагаемой модели мы должны учитывать некоторые ограничения. В частности, граф только описывает отношения между вершинами, но не показывает физическое расположение узлов. К тому же, граф

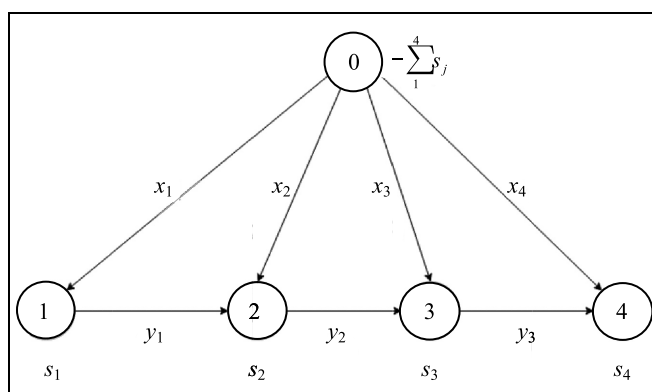


Рис. 1. Обобщенный направленный граф производственного планирования

отображает конфигурацию оборудования и материальные потоки между ними в терминах отношений между объектами управления: ресурсами, запасами, материалами и операциями [9].

В настоящей работе предлагается присваивать дугам некоторую семантическую определенность, устанавливая тип отношений между вершинами графа [2, 6]. Это обстоятельство позволяет рассматривать операционную графовую модель также и как семантическую сеть и соответственно применять к данной модели механизмы вывода, реализованные в специализированных системах. В рамках данной работы рассматривается применение графовой базы данных Neo4j [11], реализующей механизм вывода с помощью языка запросов Cypher. Это позволит воспользоваться уже реализованными алгоритмами [12], в том числе, алгоритмом Дейкстры, алгоритмом нахождения кратчайшего пути и др. Преимущество подхода, основанного на семантической сети, состоит в упрощении формальной модели данных и, как следствие, упрощении поддержки и сопровождения модели. Анализ данных осуществляется на основе механизма вывода, характерного для семантической сети [13]: запрос к данным в общем случае также отображается графом, что повышает эффективность поиска данных на основе формальных выражений, обеспечивая при этом значительный выигрыш в производительности [14].

2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА В ВИДЕ ГРАФА

Расширим рассмотренную выше модель с учетом особенностей металлургического производства. Введем понятие производственного процесса и маршрута. Производственный процесс описывается как набор технологических маршрутов. Технологический маршрут есть последовательность ресурсов (оборудования), которые используются для изготовления заданного внешним спросом продукта. При этом производственная конфигурация предполагает наличие однотипных ресурсов, например, электросталеплавильных печей, машин непрерывного литья заготовок, нагревательных колодцев, агрегатов отжига и т. д. Каждый ресурс предполагает выполнение с его помощью одной или нескольких производственных операций. Детализация операций зависит от детализации (горизонта) планирования. Маршруты при этом подразделяются на основной и альтернативные. Основной маршрут — это последовательность ресурсов, которая наиболее целесообразна с технологической или финансовой точки зрения для данного продукта. Однако маршрут, который будет выбран в ходе построения плана, определяется текущей

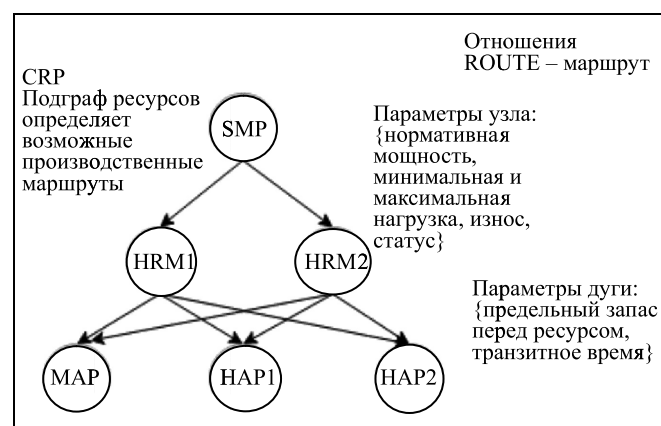


Рис. 2. Фрагмент подграфа ресурсов графовой операционной модели

производственной ситуацией и заданными ограничениями.

В данной статье рассматривается подход, при котором для моделирования технологических маршрутов применяется направленный ациклический граф (DAG, назовем его *ресурсный граф*). Каждый ресурс (рабочий центр) представляется в виде вершины (узла). Дуга между двумя ресурсами представляет часть маршрута. Операции, которые совершаются в заданном узле, моделируются не в модели маршрута, а в модели продукта (иерархии продуктов). Это связано с тем, что для различных продуктов на одном и том же ресурсе могут выполняться различные операции и даже когда это не так, параметры одной и той же операции на заданном ресурсе будут различны для разных продуктов (материалов).

Особенность предлагаемой модели заключается во введении отношений между объектами модели: в частности, между вершинами ресурсного графа имеется единственный тип отношений ROUTE, семантически указывающий направление движения потока (рис. 2). При этом можно выделить исходную вершину s и конечную вершину t , которые, соответственно, определяют начало производственного маршрута и его окончание. К примеру, на рис. 2 исходная вершина s — агрегат SMP (разливка металла) — связана с двумя вершинами HRM1 и HRM2 (стан горячего проката 1 и 2). В свою очередь, эти вершины связаны с тремя линиями отжига MAP, HAP1 и HAP2. Конечная вершина не обозначена, но, как правило, для готовой продукции это склад для последующей отгрузки. Таким образом, на рис. 2 представлены все возможные маршруты производства от разливки металла до линий отжига включительно.

Дуги данного графа ассоциированы, помимо прочих характеристик, с двумя параметрами: мак-

симальным потоком (мощностью) и текущим значением. Потоки в таком графе верифицируются в соответствии с уравнением Кирхгофа, т. е. для каждого узла сумма входящих потоков будет равна сумме исходящих. Проблема максимального потока, таким образом, состоит в поиске максимального потока, соответствующего заданным ограничениям по мощности.

Параметры узлов R_n и дуг R_e на ресурсном графе: $R_n = \{u, l, m, w\}$, $R_e = \{y, lt\}$, где u — нормативная мощность, l — минимальная загрузка, m — максимальная загрузка, w — износ ресурса, y — предельный запас перед ресурсом, lt — время передачи. Тип отношений на дуге — ROUTE, задающий направление движения материало потока по технологическому маршруту.

3. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЕРАРХИИ ПРОДУКТОВ В ВИДЕ ГРАФА

Подграф описания продуктов также представляет собой направленный ациклический граф, а тот, в свою очередь, — модель преобразования

материалов от сырья до готовой продукции в ходе производства. Поскольку DAG представляет собой обобщение такой структуры данных, как дерево, то можно говорить, что подграф описания продуктов устанавливает так называемую иерархию продуктов. В данном графе вводятся три типа отношений: DERIVED, PROCESS и SUBS, определяющие направление преобразования материалов (гладкокатанный рулон из сляба, холоднокатанный рулон из гладкокатанного рулона и др.), привязку операций к заданному материалу, а также отношение замены материалов в производстве в случае отсутствия заданного.

Для отношения DERIVED устанавливаются параметры $R_{derived} = \{yield\}$, где $yield$ — нормативный выход годного, а для отношения OPR — параметры $R_{opr} = \{pref, sdt\}$, где $pref$ — предпочтительность выполнения операции на заданном агрегате, если одну и ту же операцию можно выполнить на различных агрегатах; sdt — стандартное время выполнения операции на заданном агрегате для соответствующего продукта. Вершины подграфа продуктов определяют все возможные в производстве

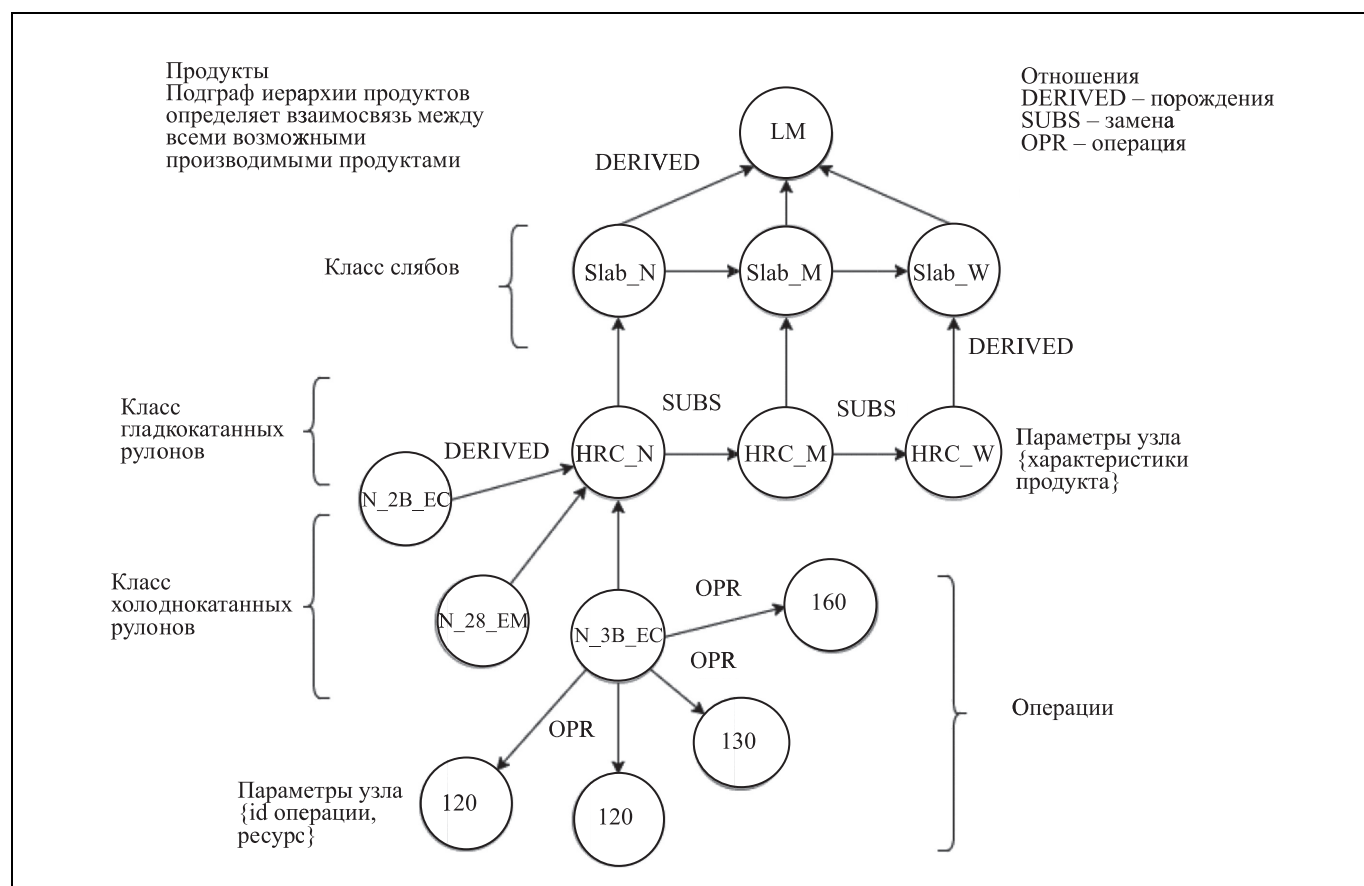


Рис. 3. Фрагмент подграфа иерархии продукта операционной модели

материалы от полуфабрикатов до готовой продукции. Кроме того, в данной модели вводится понятие классов (семейств продуктов). Каждый класс объединяет схожие по характеристикам продукты. Продукты одного класса (рис. 3) всегда находятся на одном и том же уровне иерархии и могут быть связаны отношением SUBS, позволяющим определять продукты (материалы) на замену в случае отсутствия необходимых на момент планирования. Характеристики вершины определяют значимые параметры продукта, формирующие его уникальность, и могут иметь вид:

$$R_n = \{f, desc, product_id, grade, th_aim, th_min, weight_aim, weight_min, width\},$$

где f — класс продукта, $desc$ — описание продукта, $product_id$ — номенклатурный номер продукта, $grade$ — марка стали, th_aim — целевая толщина листа в рулоне, th_min — минимальная толщина листа, $weight_aim$ — целевой вес рулона, $weight_min$ — минимальный вес рулона, $width$ — толщина рулона. Характеристики вершины определяют значимые параметры продукта, формирующие его уникальность.

4. ОПЕРАЦИОННАЯ ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ

Операционная производственная модель является графовой моделью и состоит из двух кластеров: кластера иерархии продуктов и кластера ресурсов. Связь между ними определяется через вершины операций в кластере иерархии и вершины ресурсов в кластере ресурсов (рис. 4). Таким образом задается новый тип отношений RES, определяющий ресурс, на котором выполняется заданная операция при производстве определенного продукта. В приведенном далее примере показаны производственные ресурсы, включающие в себя переделы разливки (SMP), горячего проката (HRM), отжига (MAP/HAP), холодного проката (CRM), линии гальванизации (CGL), отжига (CAP), резки (CUT) и упаковки (PKG). Для отношения RES устанавливаются параметры: $R_{res} = \{p, r\}$, где p — производительность ресурса при данной операции для производства соответствующего материала, r — плановые отходы для заданной операции на данном ресурсе.

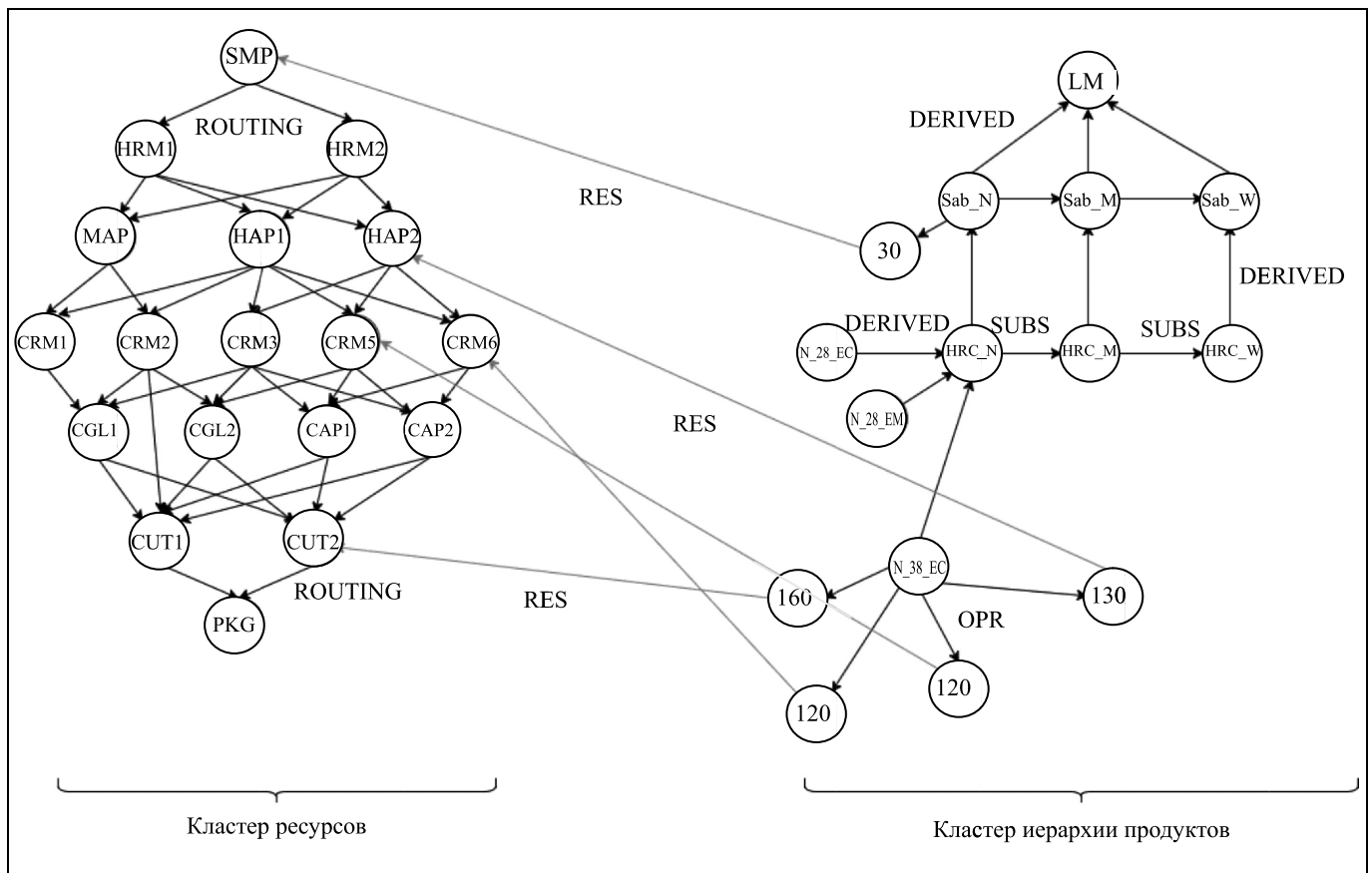


Рис. 4. Фрагмент операционной графовой модели

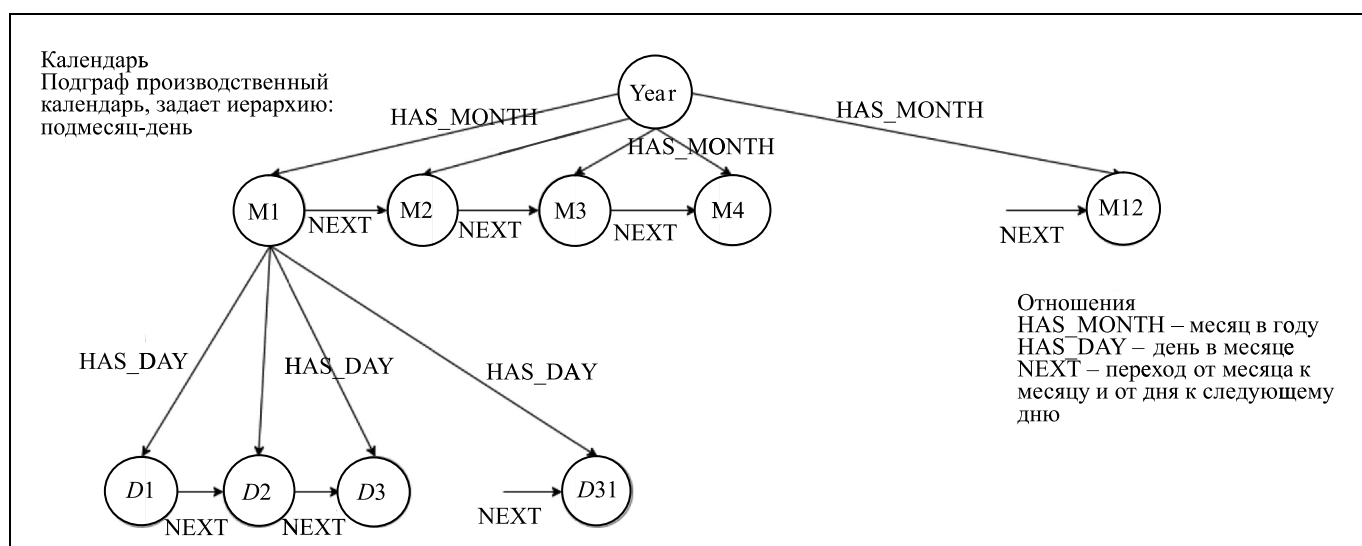


Рис. 5. Фрагмент подграфа календарного года

Операционная графовая модель позволяет решать задачу выбора технологического маршрута, учитывая возможность использования альтернативных ресурсов, расчет брутто- и нетто-потребности в материалах для производства заданного объема готовой продукции. Для решения задач планирования производства введем в рассмотренную выше модель время. Это позволит решать задачи планирования и привести операционную графовую модель к виду направленного графа производственного планирования. В частности, в данной работе будут рассмотрены принципы решения с помощью графовой модели задачи планирования материалов (MRP) и задачи планирования требуемой мощности (CRP). Построим графовую модель календарного года (рис. 5).

Вершины $M1, M2, \dots, M12$ отражают 12 месяцев в году, отношение NEXT задает последовательность перехода от месяца к месяцу. Каждая вершина месяца связана с вершинами $D1, D2, \dots$, задающими дни месяца отношением HAS_DAY.

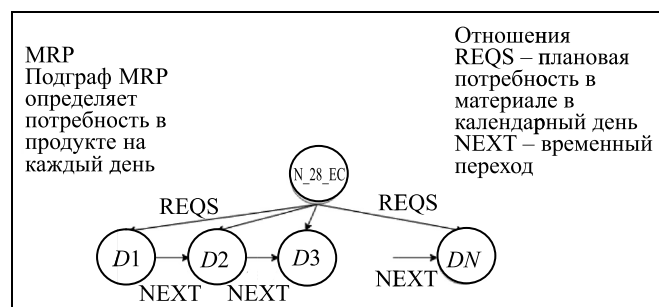


Рис. 6. Фрагмент операционной модели (плановой потребности в материалах)

Вершина Year определяет календарный год и связана с вершинами $M1, M2, \dots$ отношением HAS_MONTH.

Для решения задачи планирования материалов свяжем каждую вершину, определяющую продукт, с соответствующей вершиной календаря (рис. 6).

На рис. 6 показан фрагмент операционной производственной модели, иллюстрирующий связь каждого продукта (материала) с календарем. Отношение REQS определяет потребность в заданном материале (в данном случае, N_2B_EC) на каждый календарный день. Здесь важно отметить, что параметры дуги между узлом продукта и узлом календарного дня (отношение REQS) назначаются динамически и меняются каждый раз при пересчете плана потребности в материалах до момента реализации плана. Характеристики отношения $R_{REQS} = \{v_1/o_1, v_2/o_2, \dots, v_n/o_n\}$, где каждая характеристика есть пара потребность определенного материала v_i в заданный календарный день в соответствии с заказом o_i .

Плановая мощность задается добавлением связи между узлами ресурсов операционной модели и календарем. На рис. 7 показан фрагмент модели, определяющий плановые мощности ресурсов CRM2 и CGL1 на заданном горизонте планирования (календарный месяц). Плановая мощность определяется как количество времени, запланированное к использованию данного ресурса в плановый период, в данном случае день. Характеристики отношения $R_{HAS_CPTY} = \{t_{p1}/o_1, t_{p2}/o_2, \dots, t_{pn}/o_n\}$, где каждая характеристика есть плановое время работы заданного ресурса в заданный период времени для заказа o_i .

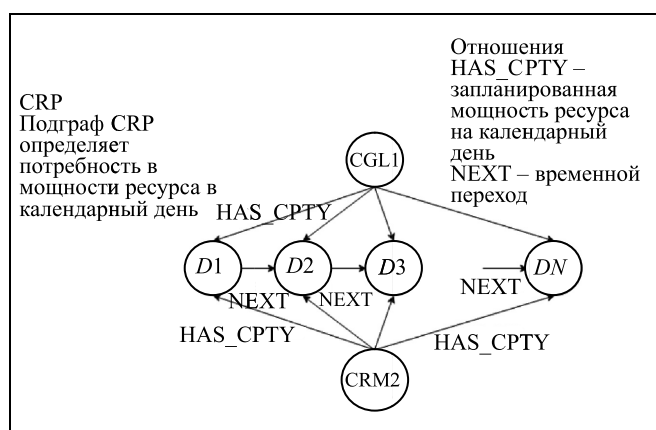


Рис. 7. Фрагмент операционной модели (плановой мощности)

Таким образом, мы усовершенствовали исходную модель производственного планирования, преобразовав исходный направленный граф в значительно более сложную структуру, в которой можно выделить несколько кластеров — временной, ресурсный и операционный. Переход к графовой модели такой структуры позволяет решать задачи производственного планирования, определяемые уже внешним спросом, т. е. спросом на готовую продукцию. Исходными данными для решения задачи производственного планирования по построенной модели может служить либо сформированный портфель заказов, либо прогноз, либо комбинация принятых заказов и прогноза, а также уровни запасов, включая незавершенное производство и готовую продукцию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная графовая операционная модель управления производственным комплексом позволяет решать задачи производственного планирования с горизонтом от нескольких недель до 12–16 мес. В зависимости от детализации исходных данных и точности планирования, данная модель позволяет решать задачу планирования продаж (S&OP), составления планов производства (MPS), расчета в потребности в материалах (MRP) и планирования требуемой мощности (CRP). Для управления производством необходимо обеспечить обратную связь от уровня исполнения производства. Дальнейшие исследования связаны с доработкой операционной модели, в частности, с обеспечением возможности построения детальных планов-графиков для каждого ресурса и контроля исполнения планов всех уровней путем разработки единой операционной модели как для планирования, так и для контроля (MES).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sokolov B., Ivanov D., Dolgui A., Pavlov A. Structural quantification of the ripple effect in the supply chain // International Journal of Production Research. — 2016. — Vol. 54, N 1. — P. 152–169.
2. Caux C., Barth M., De Guio R. Graph Based Tools for Production Flows Analysis // IFAC Proceedings Volumes. — 2000. — Vol. 33, N 17. — P. 885–889.
3. Zhang H.C., Kuo T.C. A Graph-Based Approach to Disassembly Model for End-of-Life Product Recycling // Nineteenth IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. — Austin, 1996. — P. 247–254.
4. Tick J. P-Graph-based workflow modelling // Acta Polytechnica Hungaria. — 2007. — Vol. 4, N 1. — P. 75–88.
5. Kharlamov E., Grau B.C., Jiménez-Ruiz E., et al. Capturing industrial information models with ontologies and constraints // 15th Int. Semantic Web Conference. — Kobe, 2016. — P. 325–343.
6. Petersen N., Galkin M., Lange C., et al. Monitoring and automating factories using semantic models // 6th Joint International Semantic Technology Conference. — Singapore, 2016. — P. 315–330.
7. Rychtyckij N., Raman V., Sankaranarayanan B., et al. Ontology reengineering: a case study from the automotive industry // Proceedings of the Twenty-Eighth AAAI Conference on Innovative Applications. — Phoenix, 2016. — P. 3974–3981.
8. Tilstra A.H., Campbell M.I., Wood K.L., Seepersad C.C. Comparing matrix-based and graph-based representations for product design // 12th international dependency and structure modelling conference. — Cambridge, 2010. — P. 195–206.
9. Veinott A.F. Lectures on Supply Chain Optimization. — Stanford University, 2005. — 261 p.
10. Мауэргауз Ю.Е. «Продвинутое» планирование и расписания (AP & S) в производстве и цепочках поставок. — М.: Экономика, 2012. — 574 с.
11. Jordan. G. Practical Neo4j. — N.-Y.: Apress, 2014. — 408 p.
12. Jungnickel D. Graphs, Networks and Algorithms, Algorithms and Computation in Mathematics. Vol. 5. — Berlin: Springer Verlag, 2005. — 615 p.
13. Santoso A.F., Supriana I., Surendro K. Designing Knowledge of The PPC with Semantic Network // Journal of Physics Conference Series. — 2017. — Vol. 801.
14. Buerli M. The Current State of Graph Databases / Technical Report, Department of Computer Science, Cal Poly, San Luis Obispo, 2012.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Н.Н. Бахтадзе.

Кузнецов Денис Сергеевич — ассистент¹⁾, аспирант²⁾,
✉ kuznetsov.ds@isis.ru,

Котеленко Сергей Анатольевич — канд. техн. наук, доцент¹⁾,
✉ s.kotelenko@hotmail.com,

Пятацкий Валерий Ефимович — д-р техн. наук, зав. кафедрой¹⁾,
✉ 7621496@gmail.com,

¹⁾ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва.

²⁾ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва.

Поступила в редакцию 23.07.2018, после доработки 05.10.2018.

Принята к публикации 17.10.2018.

ПОСТРОЕНИЕ РАСПИСАНИЙ РАБОТЫ СБОРОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ В МЕЛКО- И СРЕДНЕСЕРИЙНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ю.А. Зак

Приведены алгоритмы решения актуальной для мелко- и среднесерийного производства задач построения расписаний выполнения сборочных работ для некоторого множества различных по технологии производства изделий. Критерием оптимальности сформулированной задачи служит выполнение всего комплекса работ в кратчайшие сроки. Предложен эвристический алгоритм приближенного решения задачи. Определены эффективная для практических приложений и близости к нижней границе оптимального решения последовательность включения изделий в сборочный процесс, времена начала и окончания выполнения операций сборки всех изделий на каждом из сборочных постов, а также время завершения выполнения планового задания. Разработанные алгоритмы проиллюстрированы числовыми примерами.

Ключевые слова: сборочный конвейер, оптимальная последовательность, сборочные работы, алгоритм построения расписаний.

ВВЕДЕНИЕ

Сборочный конвейер и конвейерная организация производства — это одна из форм организации технологического процесса в автомобиле- и машиностроении, в электронной, деревообрабатывающей и приборостроительной отраслях промышленности. Изделие перемещается по сборочным постам, постепенно проходя все этапы сборки. За каждым постом сборки любого изделия закреплен определенный объем работ. Темп сборки строго регламентирован. Оснащенные оборудованием, измерительной аппаратурой, необходимым инструментом и обслуживающим персоналом сборочные посты конвейера расположены последовательно в направлении движения обрабатываемого изделия. В каждый момент времени на сборочном конвейере осуществляется одновременно сборка сразу нескольких изделий, число которых меньше или равно числу последовательно работающих сборочных постов. После завершения выполнения всех операций на каждом сборочном посту обрабатываемое изделие перемещается на следующий стоящий в последовательной цепочке сборочный пост. Все операции должны выполняться в определенной технологической последовательности, которая и определяет разбиение всего множества технологи-

ческих операций на непересекающиеся подмножества и назначение выполнения этих подмножеств операций на различные посты сборочного конвейера. Перемещение изделия на следующую стадию обработки происходит на всех постах одновременно после заключительного момента завершения процесса обработки на последнем из них.

Проблемы построения расписаний и балансировки сборочных конвейеров возникают при решении различных задач разработки технологии, аппаратного оснащения, проектирования, организации и оперативного управления конвейерным производством [1—8]. Эффективное решение этих проблем позволяет повысить производительность работы конвейерных линий, сократить затраты на основное и вспомогательное оборудование сборочных постов и заработную плату обслуживающего персонала, а также число сборочных постов и требуемые объемы производственных площадей.

Основная задача организации сборочного производства заключается в оптимальном распределении всего множества технологических операций по постам сборочного конвейера, что обеспечит правильную организацию технологического процесса, наиболее равномерную загрузку во времени и синхронизацию работы всех сборочных постов конвейерной линии. Решение данной задачи наиболее актуально для массового и крупносерийного



производства. В течение последних 60 лет решению этой задачи, которая относится к классу NP-сложных, посвящено большое количество публикаций (см., например, [1, 5–7, 9, 10]). До настоящего времени не предложены эффективные алгоритмы получения точных решений сформулированной задачи в условиях большой размерности с учетом всех ограничений, которые должны учитываться в реальных производственных ситуациях. Применяемые на практике методы решения, основанные на методах глобального случайного поиска, генетических алгоритмах и эволюционных стратегиях, требуют больших объемов вычислений, не гарантируют получения точных решений и не дают оценки точности полученного приближенного решения. Эффективные приближенные методы решения предложены в публикациях [1, 2, 5–7, 9, 10].

В данной работе рассматривается другая задача, актуальная для мелко- и среднесерийного производства, которой уделено недостаточное внимание в литературе: построение расписаний выполнения сборочных работ для некоторого множества различных по технологии сборки изделий, обеспечивающих выполнение всех производственных операций в кратчайшие сроки.

На сборочном конвейере, содержащем K , $k = 1, \dots, K$, последовательно расположенных в линию сборочных постов, необходимо осуществить сборку n изделий, $i = 1, \dots, n$, различных по техническим характеристикам и множествам выполняемых на каждом посту технологических операций. Времена выполнения всех операций на каждом сборочном посту различны и равны t_i^k , а следовательно, и времена такта конвейерной линии для сборки каждого изделия τ_i также различны. Поступая на первый пост сборки, каждое изделие не может быть снято со сборочного конвейера и должно затем пройти все последующие сборочные посты. Таким образом, в каждый момент времени на различных постах сборочного конвейера может осуществляться сборка нескольких различных изделий. Необходимо найти последовательность включения изделий в сборочный процесс, времена начала и завершения сборки всех изделий на каждом и на последнем сборочном посту, обеспечивающих выполнение расписания всех сборочных работ в кратчайшие сроки.

1. ПОСТАНОВКА И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

Обозначим $i = 1, \dots, n$ — число изделий, сборка каждого из которых производится в установленной технологической последовательности; $k = 1, \dots, K$ — число сборочных постов, одинаковое для каждого

изделия; τ_i — время такта сборки i -го изделия; x_i^k , θ_i^k , $i = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, K$ — соответственно время начала и завершения работ по сборке i -го изделия на k -м сборочном посту, T_i — время завершения сборки i -го изделия.

Тогда, если производится сборка только одного изделия, для вычисления времен начала и завершения процесса сборки на каждом посту справедливы соотношения:

$$\begin{aligned} x_1^1 &= 1, \quad x_1^k = \theta_1^{k-1} + 1, \quad k = 2, \dots, K; \\ \theta_1^1 &= x_1^1 + \tau_1, \quad x_1^2 = \theta_1^1 + 1, \\ \theta_1^2 &= x_1^2 + \tau_1, \dots, x_1^k = \theta_1^{k-1} + 1, \\ \theta_1^k &= x_1^k + \tau_1, \dots, x_1^K = \theta_1^{K-1} + 1, \\ \theta_1^K &= x_1^K + \tau_1 + 1. \end{aligned}$$

Если учитывается время g перемещения изделия с одного сборочного поста на другой, то времена θ_i^k определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_1^1 &= 1; \quad x_i^k = \theta_i^{k-1} - 1 + 1 + g, \quad k = 2, \dots, K; \\ \theta_i^k &= x_i^k + \tau_i, \quad k = 1, \dots, K; \quad T_i = \theta_i^K, \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Рассмотрим случай, когда на одном сборочном конвейере на различных его постах производится сборка сразу нескольких изделий. При этом возможны случаи, когда на k_1 -м посту выполняются работы по сборке i_1 -го изделия, а на k_2 -м посту — i_2 . Времена начала и завершения выполнения всех операций на каждом посту, кратные соответствующим временам такта сборки соответствующих изделий τ_i , определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \theta_2^1 &= \theta_1^1 + \tau_2 + 1, \quad \theta_2^2 = \max(\theta_1^2, x_2^1 + \tau_2) + \tau_2, \\ x_i^1 &= 1; \quad x_i^1 = \theta_{i-1}^1 + 1; \quad \theta_i^1 = \theta_{i-1}^1 + \tau_i + 1, \\ \theta_i^2 &= \max(\theta_{i-1}^2, x_i^1 + \tau_i) + \tau_i, \dots, \theta_i^n = x_{i-1}^1 + \tau_n, \\ \theta_n^2 &= \max(x_{n-1}^2, x_n^1 + \tau_n) + \tau_n, \dots, \theta_n^k = \\ &= \max(x_{n-1}^k, x_n^{k-1} + \tau_n) + \tau_n, \\ \theta_n^K &= \max(x_{n-1}^K, x_n^{K-1} + \tau_n) + \tau_n. \end{aligned}$$

Время завершения всего комплекса работ по сборке всех n изделий

$$T = \max_{1 \leq i \leq n} \theta_n^K.$$

Пусть число сборочных постов для каждого из изделий различно, т. е. равно $K_1, K_2, \dots, K_p, \dots, K_n$ (причем $K_i \leq K$ и $\max_{1 \leq i \leq n} K_i = K$), и процесс сборки изделий ведется в той же последовательности, т. е.

если ведется сборка каждого i -го изделия, то процесс сборки проходит последовательно на всех K_i сборочных постах. Работы по сборке каждого из изделий на всех постах сборочного конвейера завершаются в соответствии с формулами:

$$x_1^1 = 1, \quad x_1^k = \theta_1^{k-1} + g + 1, \quad k = 2, \dots, K;$$

$$\theta_1^k = x_1^k + \tau_1, \quad k = 1, \dots, K_1.$$

Времена завершения обработки других изделий $i = 2, \dots, n$ на всех постах сборочного конвейера $k = 1, \dots, K$ определяются по формулам:

$$x_1^1 = 1; \quad x_1^k = \theta_1^{k-1} + \gamma_2^k g + 1, \quad k = 2, \dots, K;$$

$$\theta_2^k = x_2^k + q_2^k \tau_2, \quad k = 2, \dots, K_2;$$

$$x_i^k = \max(\theta_{i-1}^2, \theta_{i-2}^3, \dots, \theta_{\min(i-2, K-2)}^{\max[2+\min(i-2, K-2)]}) + g + 1, \quad k = 1, \dots, K_i;$$

$$\theta_i^k = x_i^k + q_i^k \tau_i, \quad k = 1, \dots, K_i;$$

$$\text{где } q_i^k = \begin{cases} 1, & \text{если } K_{i-1} \geq k, \\ 0, & \text{если } K_{i-1} \leq k, \end{cases} \quad \gamma_i^k = \begin{cases} 1, & \text{если } K_i \geq k, \\ 0, & \text{если } K_i \leq k; \end{cases}$$

$k = 1, \dots, K, i = 2, \dots, n$.

Следовательно,

$$T = \max_{1 \leq i \leq n} \theta_i^{K_i}.$$

2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПОДАЧИ ИЗДЕЛИЙ НА СБОРОЧНЫЙ КОНВЕЙЕР

Обозначим $\tilde{J} = \{i_1, i_2, \dots, i_k, \dots, i_n\}$ — заданная последовательность сборки изделий; K — число сборочных постов сборочного конвейера, $k = 1, \dots, K$. Пусть время сборки i -го изделия на k -м сборочном посту равно t_i^k , а время такта сборочного конвейера при сборке этого i -го изделия $\tau_i = \max_{1 \leq k \leq K_i} t_i^k$. Оп-

ределим в этих условиях более точно времена такта сборочного конвейера при одновременной работе по сборке на различных постах сразу множества изделий, запускаемых в заданной последовательности $\tilde{J}$, которые обозначим по индексу i собираемого на первом сборочном посту изделия переменной σ_i ,

$$\sigma_i = \max(t_i^1, q_{i-1}^2 t_{i-1}^2, \dots, q_{i-k-1}^k t_{i-k}^{k+1}, q_{i-k}^{k+1} t_{i-k}^{k+1}, \dots, q_{i-K}^{K+1} t_{i-K-1}^K), \quad k = 1, \dots, K, \quad i = 1, \dots, n.$$

При сделанных предположениях времена начала и завершения сборки каждого стоящего в пос-

ледовательности $\tilde{J}$ изделия на всех постах сборочного конвейера определяются по формулам:

$$x_{i_1}^1 = x_1^1 = 1, \quad \theta_{i_1}^1 = x_{i_1}^1 + t_{i_1}^1; \quad \theta_i^1 = x_i^k + t_i^k;$$

для пар индексов $(i, k) = (i_1 - r, k), r = 0, 1, \dots, k - R; k = 1, \dots, R$:

$$\begin{aligned} \theta_{i_1}^k &= \theta_{i_1-1}^{k-1} = \dots = \theta_{i_1-k+1}^1 = \theta_{i_1+1}^{k-1} = \theta_{i_1+r}^{k-r+1} = \dots \\ &= \theta_{i_1+R-1}^R = \theta_{i_1}^{k-1} + g + \max(\bar{t}_{i_1}^k, \bar{t}_{i_1-1}^{k+1}, \dots, \\ &\quad \bar{t}_{i_1-r}^{k+r}, \dots, \bar{t}_{i_1-R}^R, \bar{t}_{i_1+1}^{k-1}, \dots, \bar{t}_{i_1+k-1}^1), \\ &\quad k = 1, \dots, n; \quad r = 1, \dots, R, \end{aligned}$$

где R — число одновременно находящихся на сборочном конвейере изделий, которое может быть меньше или равно числу сборочных постов конвейера.

Здесь

$$\bar{t}_i^r = \begin{cases} t_i^r, & \text{если } r \geq 1, r \leq K, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases}$$

$$r = (i_1 - k + 1), (i_1 - k + 2), \dots, i_1, (i_1 + 1), \dots, (i_1 + R - 1), \quad k = 1, 2, \dots, K.$$

Время завершения сборки всех n изделий определяется выражением $T = \theta_n^R$.

Пример 1. Производится сборка 3-х изделий в заданной последовательности на 4-х сборочных постах. Времена сборки каждого изделия на различных сборочных постах приведены в табл. 1. Временем перемещения изделия с одного поста на другой можно пренебречь.

Далее приведены расчеты времен начала и завершения сборки каждого изделия на каждом посту сборочного конвейера в указанной в табл. 1 последовательности:

$$x_1^1 = 1, \quad \theta_1^1 = 5 + 1 = 6;$$

$$x_2^1 = x_1^2 = 6 + 1 = 7; \quad \theta_1^2 = 7 + 6 = 13; \quad \theta_2^1 = 7 + 6 = 13;$$

$$x_3^1 = x_2^2 = x_1^3 = \max(\theta_1^2, \theta_2^1) + 1 = \max(13, 13) + 1 = 14;$$

$$\theta_1^3 = 14 + 7 = 21; \quad \theta_2^2 = 14 + 7 = 21; \quad \theta_3^1 = 14 + 8 = 22;$$

$$\begin{aligned} x_3^2 = x_2^3 = x_1^4 &= \max(\theta_1^3, \theta_2^2, \theta_3^1) + 1 = \\ &= \max(21, 21, 22) + 1 = 23; \end{aligned}$$

Таблица 1

Времена выполнения операций на сборочных постах

Номер изделия	Времена сборки изделий на постах				Время такта сборки
	1	2	3	4	
1	5	6	7	4	7
2	6	7	5	7	7
3	8	6	9	5	9



$$\theta_1^4 = 23 + 4 = 27, \theta_2^3 = 23 + 5 = 28, \theta_3^2 = 23 + 6 = 29;$$

$$x_3^3 = x_2^4 = \max(\theta_1^4, \theta_2^3, \theta_3^2) + 1 = \\ = \max(27, 28, 29) + 1 = 30;$$

$$\theta_2^4 = 30 + 7 = 37; \quad \theta_3^3 = 30 + 9 = 39.$$

3. АЛГОРИТМ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНЫХ РАСПИСАНИЙ СБОРОЧНЫХ РАБОТ

Определим S тактов перемещения изделий по постам сборочного конвейера в процессе выполнения всех работ $s = 1, \dots, S$, причем $S = n + K - 1$. В первые n тактов перемещения сборочного конвейера на первый пост сборки поступает некоторое новое изделие, а все изделия, уже находящиеся в процессе сборки, кроме изделия, находящегося на K -м посту, перемещаются на следующий $(k + 1)$ -й пост конвейера. На последних $(K - 1)$ тактах сборки происходит только перемещение всех изделий, оставшихся в процессе сборки, на следующий $(k + 1)$ -й пост.

Определим достаточно грубую нижнюю границу минимального значения критерия оптимальности. Длина расписания не может быть меньше времени сборки изделия, требующего максимального времени выполнения операций на всех

постах сборки, т. е. времени $L_j = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{k=1}^K t_i^k$.

Сборка каждого из других изделий подмножества $\tilde{J} = (\tilde{I}/\tilde{j})$ может начинаться либо раньше, либо после времени начала сборки этого $\tilde{j}$ -го изделия, увеличивая при этом суммарное время выполнения всего расписания, по крайней мере, на величину $\bar{d}_i = \min(t_i^1, t_i^K)$, $i \in \tilde{J}$. Следовательно, время выполнения расписания не может быть меньше величины

$$\xi(\tilde{T}) = \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{k=1}^K t_i^k + \sum_{i \in \tilde{J}} \min(t_i^1, t_i^K).$$

Введем обозначения $\tilde{I}_1^s$ и $\tilde{I}_2^s$, где $\tilde{I}_1^s \cup \tilde{I}_2^s = \tilde{I} = \{1, \dots, n\}$ и $\tilde{I}_1^s \cap \tilde{I}_2^s = \emptyset$ соответственно подмножества индексов изделий, включенных и невключенных в процесс сборки на s -м шаге перемещения сборочного конвейера. В начале процесса положим $\tilde{I}_1^s = \emptyset$, $\tilde{I}_2^s = \tilde{I}$. Алгоритм решения задачи предусматривает выполнение следующих шагов.

Шаг 1. Среди всех изделий $i = 1, \dots, n$ выбираем j -е изделие, для которого справедливо соотношение $t_j^1 = \min_{1 \leq i \leq n} t_i^1$. Если таких изделий некоторое

подмножество $j \in \tilde{J}^1$, то определяем $t_{j_1}^2 = \min_{i \in \tilde{J}^1} t_i^2$.

В случае наличия подмножества таких изделий $j_1 \in \tilde{J}^2$ находим изделия, удовлетворяющие соотношению $t_{j_2}^3 = \min_{i \in \tilde{J}^2} t_i^3$. Эту процедуру выполняем

до тех пор, пока на некотором k -м шаге расчета не получим подмножество $\tilde{J}^{k-1}$, состоящее из одного элемента. Если выполнено $k = (K - 1)$ таких вычислений и подмножество $j \in \tilde{J}^{(K-1)}$ состоит не из одного, а из нескольких элементов, то среди них выбирается элемент (изделие) с наименьшим индексом. Обозначим индекс этого изделия $\bar{j}_1$, время сборки которого на первом сборочном посту равно $t_{\bar{j}_1}^1$. Включаем изделие с индексом $\bar{j}_1$ в процесс сборки, устанавливая его на первый пост сборочного конвейера, перемещаем все изделия, уже находящиеся в процессе сборки, на следующий пост.

Определяем $\tilde{I}_1^1 = \bar{j}_1$, $\tilde{I}_2^1 = \tilde{I} / \bar{j}_1$.

Выполняем вычисления

$$x_{\bar{j}_1}^1 = 1, \quad \theta_{\bar{j}_1}^1 = x_{\bar{j}_1}^1 + t_{\bar{j}_1}^1; \quad x_{\bar{j}_1}^2 = x_{\bar{j}_1}^1 = \theta_{\bar{j}_1}^1 + g + 1, \\ T^1 = \theta_{\bar{j}_1}^1.$$

Переходим к шагу 2.

Шаг 2. Этот шаг выполняется в течение первых из $s = 2, \dots, n$ тактов перемещения изделий на постах сборочного конвейера. Определим время σ^s такта сборочного конвейера на данном шаге его перемещения по формуле

$$\sigma^s = \max_{1 \leq p \leq (K-1)} q^{(s-p), p} t^{(s-p), p}.$$

Среди подмножества изделий $\tilde{I}_1^s \neq \emptyset$ находим подмножество изделий $\tilde{Y}_1^s \subseteq \tilde{I}_1^s$, для которых справедливы неравенства

$$t_{j_s}^s = \{t_i^s \leq \sigma^s \mid i \in \tilde{I}_1^s\}.$$

Если $\tilde{Y}_1^s \neq \emptyset$, то в случае, если множество $\tilde{Y}_1^s$ включает в себя только одно изделие с индексом $\bar{j}_s$, переходим к шагу 3. Если же $\tilde{Y}_1^s \neq \emptyset$ и оно состоит из некоторого подмножества изделий, то находим индексы изделий, удовлетворяющих соотношению $t_{j_s}^2 \leq t_{\bar{j}_s}^s$, определяем $t_{j_s}^2 = \min_{i \in \tilde{Y}_1^s} t_i^2$. Нахо-

дим подмножество изделий $\tilde{Z}_1^s \subseteq \tilde{I}_1^s$, для которых справедливо соотношение $\tilde{t}_r^{2s} \leq t_{j_s}^2$.

Если $\tilde{Y}_1^s \neq \emptyset$, то находим подмножество изделий $\tilde{Z}_1^s \subseteq \tilde{I}_1^s$, для которых справедливо соотношение $\tilde{t}_r^{1s} = \min_{i \in \tilde{I}_1^s} t_i^s$. Если подмножество $\tilde{Z}_1^s$ включает в себя только одно изделие с индексом $\tilde{j}_s$, то переходим к шагу 3. В противном случае, если $\tilde{Z}_1^s \neq \emptyset$, то находим индексы изделий, удовлетворяющих соотношению $t_{j_s}^2 \leq t_{\tilde{j}_s}^2$, определяем $t_{j_s}^2 = \min_{i \in \tilde{Z}_1^s} t_i^2$.

Находим подмножество изделий $\tilde{Z}_1^s \subseteq \tilde{I}_1^s$, для которых справедливо соотношение $\tilde{t}_r^{2s} \leq t_{j_s}^2$. Если подмножество $\tilde{Z}_1^s$ включает в себя только одно изделие с индексом $\tilde{j}_s$, то переходим к шагу 3.

Как и на первом шаге, эту процедуру для подмножеств $\tilde{Y}_l^s$ или $\tilde{Z}_l^s$ выполняем до тех пор, пока на некотором k -м шаге расчета не получим некоторое подмножество $\tilde{J}^{k-1} = \tilde{Z}_l^s$ или $\tilde{J}^{k-1} = \tilde{Z}_l^s$, состоящее из одного элемента. Если выполнено $k = (K - 1)$ таких вычислений и подмножество $j \in \tilde{J}^{(K-1)}$ состоит не из одного, а из нескольких элементов, то среди них выбирается элемент (изделие) с наименьшим индексом $\tilde{j}_s$. Переходим к шагу 3.

Шаг 3. Включаем изделие с индексом $\tilde{j}_s$ в процесс сборки, устанавливая его на 1-й пост сборочного конвейера, перемещаем все изделия, уже находящиеся в процессе сборки, на следующий пост. Определяем $\tilde{I}_1^1 = \tilde{j}_s$, $\tilde{I}_2^1 = \tilde{I}_2^1 / \tilde{j}_s$. Выполняем вычисления:

$$\begin{aligned} x_{j_s}^1 &= x_{j_{s-1}}^2 = x_{j_{s-2}}^3 = \dots = x_{j_{s-K+1}}^K = \theta_{j_s}^1 + g + 1, \\ \theta_{j_{s-1}}^2 &= \theta_{j_{s-2}}^3 = \dots = \theta_{j_{s-K+2}}^{K-1} = \\ &= x_{j_{s-1}}^1 + \max(t_{j_{s-1}}^1, \sigma^s); \quad T^s = \theta_{j_{s-1}}^2. \end{aligned} \quad (1)$$

Если $\tilde{I}_1^1 \neq \emptyset$, то переходим к шагу 2. В противном случае, если $\tilde{Y}_1^1 \neq \emptyset$, то переходим к шагу 4.

Шаг 4. На s -м шаге, где $n < s \leq n + K - 1$, перемещаем все изделия, еще находящиеся в процессе сборки, на следующий пост. Выполняем вычисления в соответствии с выражением (1). Если

$s = n + K - 1$, то положив $\tilde{T}_{j_s} = \theta_{j_s}^K$, $T = \max_{1 \leq i \leq n} \theta_i^K$, алгоритм заканчивает свою работу.

Если $s < n + K - 1$, то вновь выполняем шаг 4 алгоритма.

Пример 2. На 5-ти сборочных постах производится сборка 4-х изделий. Времена сборки каждого изделия на различных сборочных постах приведены в табл. 2. Время перемещения изделия с одного поста на другой равно 1. Необходимо найти последовательность подачи изделий на сборочный конвейер, времена начала и завершения сборки всех изделий на каждом сборочном посту, а также времена завершения сборки каждого изделия, минимизирующие время выполнения всего планового задания.

Ниже приведены результаты выполненных расчетов в соответствии с описанным алгоритмом.

Число тактов перемещения изделий по постам сборочного конвейера $S = 4 + 5 - 1 = 8$, $\tilde{I}_1 = \tilde{I} = \{1, 2, 3, 4\}$; $\tilde{I}_2 = \emptyset$.

Шаг 1. $s = 1$; $t_j^1 = \min_{1 \leq i \leq n} t_i^1 = \min(7, 5, 6, 8) = 5$. Следовательно, первым в процесс сборки включается 2-е изделие.

Шаг 3. $x_2^1 = 1$, $\theta_2^1 = x_2^1 + t_2^1 = 1 + 5 = 6$; $x_2^2 = \theta_2^1 + g = 6 + 1 + 1 = 8$; $\tilde{I}_1^1 = \{1, 3, 4\}$, $\tilde{I}_2^1 = \{2\}$.

Так как $\tilde{I}_1^2 \neq \emptyset$, то выполняем шаг 2.

Шаг 2. $s = 2$; $\lambda_s = t_2^2 = 6$; $\{i | \tilde{Y}_1^2 \subseteq \tilde{I}_1^1; t_i^1 \leq \lambda_1\} = \{3\}$, $t_3^1 = 6$. Выбираем 3-е изделие.

Шаг 3. $x_3^1 = 8$, $\theta_3^1 = 8 + 6 = 14$; $\theta_2^2 + t_2^2 = 8 + 6 = 14$; $x_3^2 = x_3^1 = \max(12, 14) + 1 + 1 = 16$; $\tilde{I}_1^2 = \{1, 4\}$, $\tilde{I}_2^2 = \{2, 3\}$.

Так как $\tilde{I}_1^3 \neq \emptyset$, то выполняем шаг 2.

Шаг 2. $s = 3$; $\sigma^2 = \max(t_2^3, t_3^2) = \max(7, 7) = 7$; $\{i | \tilde{Y}_1^3 \subseteq \tilde{I}_1^2; t_i^1 \leq \sigma^2\} = \{1\}$, $t_1^1 = 7$. Выбираем 1-е изделие.

Шаг 3. $x_1^1 = 16$; $\theta_1^1 = x_1^1 + t_1^1 = 16 + 7 = 23$; $\theta_3^2 + t_3^2 = 16 + 7 = 23$; $\theta_2^3 + t_2^3 = 16 + 7 = 23$; $x_1^2 = x_3^3 = x_2^4 = \max(23, 23, 23) + 1 + 1 = 25$; $\tilde{I}_1^3 = \{4\}$, $\tilde{I}_2^3 = \{1, 2, 3\}$. Так как $\tilde{I}_1^4 \neq \emptyset$, то выполняем шаг 2.

Таблица 2

Времена сборки изделий на различных постах

Номер изделия	Времена сборки изделий на постах					Время такта сборки
	1	2	3	4	5	
1	7	4	6	5	7	7
2	5	6	7	5	6	7
3	6	7	7	6	5	7
4	8	7	8	7	6	8



Шаг 2. $s = 4$; $\lambda_3 = \max(t_2^4, t_3^3, t_2^1) = \max(5, 7, 4) = 7$.

Подмножество $\tilde{I}_1^3 = \{4\}$, т. е. включает в себя только одно изделие. Несмотря на то, что $\sigma^3 < t_4^1$, выбираем 4-е изделие.

Шаг 3. $x_4^1 = 25$; $\theta_4^1 = x_4^1 + t_4^1 = 25 + 8 = 33$,
 $\theta_1^2 = x_1^2 + t_1^2 = 25 + 4 = 29$; $\theta_3^3 = x_3^3 + t_3^3 = 25 + 7 = 32$;
 $\theta_2^4 = t_2^4 = 25 + 7 = 32$; $x_2^3 = x_3^4 = x_2^5 = \max(29, 32, 32) + 1 + 1 = 34$.

$\tilde{I}_1^4 \neq \emptyset$, $\tilde{I}_2^4 = \{1, 2, 3, 4\}$. Так как $\tilde{I}_1^4 = \emptyset$, то выполняем шаг 4.

Шаг 4. $s = 5$. Перемещаем изделия 1, 3, 4, еще находящиеся в процессе сборки, на следующий пост. Сборка второго изделия завершена, $T_2 = \theta_2^5 = 40$. Переходим к шагу 3.

Шаг 3. Вычисляем $x_2^4 = 34$; $\theta_4^2 = x_4^2 + t_4^2 = 34 + 7 = 41$, $\theta_1^3 = x_1^3 + t_1^3 = 34 + 6 = 40$, $\theta_3^4 = x_3^4 + t_3^4 = 34 + 6 = 40$, $\theta_2^5 + t_2^5 = 34 + 6 = 40$; $x_4^2 = x_1^5 = x_3^5 = \max(40, 40, 40) + 1 + 1 = 42$.

Шаг 4. $s = 6$. Перемещаем изделия 1, 4, еще находящиеся в процессе сборки, на следующий пост. Сборка 3-го изделия завершена, $T_3 = \theta_3^5 = 47$. Переходим к шагу 3.

Шаг 3. Вычисляем $\theta_4^3 = x_4^3 + t_4^3 = 42 + 6 = 48$,
 $\theta_1^4 = x_1^4 + t_1^4 = 42 + 4 = 46$, $\theta_3^5 = x_3^5 + t_3^5 = 42 + 5 = 47$;
 $x_4^3 = x_1^5 = \max(48, 46, 47) + 1 + 1 = 50$. Переходим к шагу 4.

Шаг 4. $s = 7$. Перемещаем 4-е изделие на 5-й пост сборочного конвейера.

Сборка 1-го изделия завершена, $T_1 = \theta_1^5 = 57$.

Шаг 3. Вычисляем $\theta_1^5 = x_1^5 + t_1^5 = 50 + 7 = 57$;
 $\theta_4^4 = x_4^4 + t_4^4 = 50 + 7 = 57$; $x_4^5 = \max(57, 57) + 1 + 1 = 59$.

Шаг 4. $s = 8$; $\theta_4^5 = x_4^5 + t_4^5 = 59 + 6 = 65$. Сборка последнего в последовательности 4-го изделия завершена, $T_4 = \theta_2^5 = 65$.

Время завершения выполнения расписания, т. е. всех работ по сборке изделий, $\bar{T} = \max(T_1, T_2, T_3, T_4) = (55, 40, 47, 65) = 65$. ♦

Предлагаемый эвристический алгоритм приближенного решения задачи представляет собой алгоритм полиномиальной сложности с объемом вычислений порядка $O(n^2)$ и позволяет получить хорошее для практических приложений решение задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для мелкосерийного производства в машиностроении чрезвычайно актуально построение расписаний выполнения сборочных работ на одном сборочном конвейере нескольких изделий, различных по техническим характеристикам, а также по количеству, составу и времени выполнения технологических операций. В условиях, когда определено распределение технологических операций каждого изделия по постам сборочного конвейера, в данной работе приведены алгоритмы выбора эффективной для практических приложений и близости к нижней границе оптимального решения последовательности и времен включения изделий в сборочный процесс, а также времена начала и окончания выполнения операций сборки всех изделий на каждом из сборочных постов с целью завершения времени выполнения планового задания в кратчайшие сроки. Точные методы решения задачи могут быть сконструированы на основе метода ветвей и границ, но они потребуют существенно большего объема вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В. Теория расписаний. — М.: Наука, 1975. — 359 с.
2. Танаев В.С., Ковалев М.Я., Шафранский Я.М. Теория расписаний. Групповые технологии. — Минск, Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1998. — 289 с.
3. Евгеньев Г.Б., Гаврюшин С.С., Хоботов Е.Н. Основы автоматизации технологических процессов и производств. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. — 479 с.
4. Ермолова М.А., Хоботов Е.Н. Система планирования и построения расписаний работ для предприятий с конвейерной сборкой изделий // Автоматизация в промышленности. — 2014. — № 8. — С. 3—8.
5. Зак Ю.А. Оптимальное распределение технологических операций на сборочном конвейере // Кибернетика. — 1990. — № 4. — С. 45—54.
6. Зак Ю.А. Оптимизация работы сборочного конвейерного производства. — Математические модели и алгоритмы. — Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2016. — 92 с.
7. Зак Ю.А. Повышение эффективности работы сборочных конвейерных линий // Научное обозрение: экономика и управление. — 2012. — № 4. — С. 123—134.
8. Joldbauer H. Produktionsoptimierung: Wirtschaftliche sowie kunden-orientierte Planung und Steuerung. — Berlin—Wien: Springer, 2008. — 390 s.
9. Domschke W., Scholl A., Voß S. Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. — Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005. — 456 s.
10. Brucker P. Scheduling Algorithms. — Berlin, Heidelberg und N.-Y.: Springer-Verlag, 2007. — 367 p.

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

Зак Юрий Александрович — д-р техн. наук, науч. эксперт и консультант, г. Аахен, Германия, yuriy_zack@hotmail.com.

Поступила в редакцию 14.06.2018, после доработки 03.10.2018.

Принята к публикации 17.10.2018.

АДАПТИВНЫЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ НАСТРОЙЩИК ПИД-РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ ПЕЧАМИ¹

А.И. Глущенко

Усовершенствован существующий нейросетевой настройщик ПИ-регулятора таким образом, чтобы осуществлять адаптацию параметров ПИД-регулятора. Для этого определена новая структура нейронной сети для настройщика, модернизирована его база правил, а также получен критерий оценки устойчивости для системы с настройщиком и ПИД-регулятором. Новая версия настройщика применена для управления типовой печью нагрева в рамках численных и натурных экспериментов с целью поддержания требуемого качества переходных процессов при условии нестационарности параметров печи. По сравнению с обычным ПИД-регулятором она позволила сократить энергопотребление печи в рамках натурных экспериментов на 8,4 %.

Ключевые слова: нестационарные печи нагрева, нейросетевой настройщик, ПИД-регулятор, устойчивость, база правил.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время П-, ПИ- и ПИД-алгоритмы управления широко применяются в различных отраслях промышленности, так как они просты, надежны и понятны обслуживающему персоналу [1, 2]. При этом они линейны и, как правило, в течение всего периода функционирования технологических объектов сохраняют постоянными значения своих параметров, которые были найдены в процессе пуска-наладки «в среднем» для всех режимов. Однако практически все промышленные агрегаты нелинейные и нестационарные. Применение линейных регуляторов без настройки их параметров для управления подобными объектами приводит к снижению качества переходных процессов и увеличению энергозатрат [3].

Эта проблема особенно актуальна для энергоемких отраслей промышленности, в частности, для металлургии. Один из основных объектов управления (ОУ) со значительным потреблением энергоресурсов в металлургии — нагревательные печи. Значения их параметров (постоянные времени, коэффициенты усиления) изменяются во времени

из-за изменения загрузки печи, значения задания и действующих возмущений (в частности, влияния соседних зон в случае многозонных печей). Возможное решение данной проблемы заключается в применении оптимальных или адаптивных методов управления. При внедрении в промышленность таких методов возникают трудности [4—7], связанные с выбором весовых коэффициентов минимизируемого целевого функционала и сложностью определения функциональной связи между коэффициентами критерия оптимальности и показателями качества управления (перерегулирование и др.). Преодоление этих трудностей приводит к многократному повторению процедуры синтеза регулятора, основанной на знании модели ОУ [8, 9] (что трудно выполнить в условиях производства).

Наиболее перспективны для промышленного применения те адаптивные подходы, в рамках которых не предусмотрена замена базового линейного алгоритма управления [10]. Вместо этого предполагается коррекция его параметров в режиме онлайн [1, 11, 12] путем построения так называемых настройщиков. Подробный обзор таких методов приведен в работах [1—3]. Один из основных подходов к построению настройщиков заключается в предварительной идентификации ОУ с помощью релейного регулятора [10] и тестовых сигналов — ступенчатых [11, 13, 14] и гармонических [10, 15]. Однако в условиях производства такая

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, договор № 14.575.21.0133 (RFMEFI57517X0133).



идентификация тепловых объектов не всегда обеспечивает необходимое качество управления.

Кроме того, такой настройщик может быть реализован путем применения эталонной модели [3, 16, 17] или интеллектуальных методов управления [18–20]. Эталонная модель позволяет получить уравнения для настройки коэффициентов регулятора, но одним из параметров в ней служит размер шага адаптации, определение которого представляет собой нетривиальную задачу для реального промышленного производства.

Что касается интеллектуальных методов, то они учитывают такие особенности, как знания (нечеткая логика [19, 21], экспертные системы [18]), способности к обучению и обобщению (нейронные сети [20, 22]), которыми обладает инженер АСУТП, настраивающий параметры регулятора без модели ОУ. Проблема заключается в том, что для решения рассматриваемой задачи настройщик должен сочетать в себе все эти способности человека, а упомянутые методы по отдельности не соответствуют данному требованию. Нечеткая логика требует выбора и последующей онлайн-подстройки коэффициентов нормировки значений входных и выходных параметров настройщика. База знаний экспертной системы тесно связана с динамикой конкретного ОУ из-за ограниченности возможностей по оперативному обучению таких систем. Нейронные сети могут быть обучены и автономно, и оперативно, но при этом возникает необходимость в обучающей выборке, содержащей оптимальные значения параметров регулятора для всех возможных ситуаций (для автономного обучения), и в методе расчета значения скорости обучения $\eta_k^{(q)}$ (k — номер нейрона, q — номер слоя) для оперативного обучения, а также в выборе моментов времени, когда такое обучение необходимо. Решение указанных проблем может дать подход, объединяющий в себе несколько указанных методов [23].

В частности, коллективом исследователей, в состав которого входит автор настоящей работы, был предложен нейросетевой настройщик параметров П- и ПИ-регуляторов [24–26], объединяющий нейронные сети, которые обучаются в оперативном режиме, и набор правил (отражающих опыт инженера АСУТП) для расчета скорости $\eta_k^{(q)}$ такого обучения. Такая структура позволяет преодолеть указанные проблемы и не требует наличия модели ОУ. Данный настройщик применялся для управления как металлургическими электронагревательными печами, так и электроприводами постоянного тока и позволял сохранять качество переходных процессов в условиях изменяющихся во времени значений параметров ОУ. Но нагревательные печи управляются также и с помощью ПИД-регулятора. При этом в работе [24] хотя и

упоминается ПИД-регулятор, однако результаты опытов с ним не приводятся, так как разработанная база правил (взятая из работы [26]) позволяет работать только с ПИ-регуляторами. Более того, в следствиях правил указаны конкретные скорости обучения нейронов выходного слоя, что в некоторой мере привязывает ее к динамике конкретного ОУ. К тому же в работе [24] оценивается только техническая устойчивость системы управления с настройщиком. В работе [25] используется база правил из работы [26] и разработан подход к оценке устойчивости указанной системы на основе второго метода Ляпунова, однако полученные формулы вновь применимы только для П- и ПИ-регуляторов.

Поэтому цель данного исследования состоит в:

- разработке базы правил для настройки параметров ПИД-регулятора, причем чтобы в следствиях правил находились эмпирические формулы для вычисления скорости обучения нейронов выходного слоя, что делает такую базу более универсальной;

- разработке критерия устойчивости на основе второго метода Ляпунова, позволяющего оценивать устойчивость и определять предельную скорость обучения для системы «нейросетевой настройщик + ПИД-регулятор»;

- определении структуры нейронной сети для настройщика в случае работы с ПИД-регулятором.

Достижение этой цели позволит усовершенствовать рассматриваемый подход и сделать его более универсальным.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Нейросетевой настройщик должен быть применен для системы управления, изображенной на рис. 1. Объектом управления в данной схеме служит однозонная печь нагрева или одна зона многозонной печи (применяемые, в частности, в металлургии и машиностроении), которые могут быть описаны передаточной функцией

$$W(s) = (K/(T_1s + 1))(1/(T_2s + 1))e^{-\tau s}, \quad (1)$$

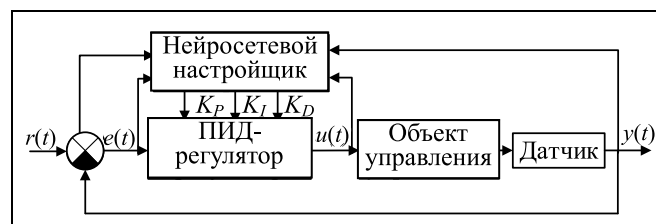


Рис. 1. Система управления с настройщиком: $r(t)$ — задание, $e(t)$ — рассогласование, $u(t)$ — управляющее воздействие, $y(t)$ — выход ОУ

где K — коэффициент усиления печи, T_1 и T_2 — постоянные времени печи и термопары, s ; τ — время запаздывания печи, s ; K , T_1 и τ не являются постоянными величинами из-за изменения задания для контура управления, загрузки и разгрузки печи, причем их значения неизвестны. График изменения задания ступенчатый и известен априори, как и требуемое качество управления.

Настройщик устанавливается на технологический агрегат, управляемый с помощью ПИД-регулятора с известными постоянными параметрами K_p , K_I и K_D . Они должны корректироваться с помощью нейросетевого настройщика, чтобы сохранить требуемое качество переходных процессов в условиях нестационарности параметров ОУ.

2. ОПИСАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ВЕРСИИ НЕЙРОСЕТЕВОГО НАСТРОЙЩИКА

Функциональная схема нейросетевого настройщика приведена на рис. 2. Он вызывается дискретно один раз в Δt секунд, получает данные от системы управления и отправляет их в активную на данный момент нейронную сеть. Поскольку нагревательные печи представляют собой несимметричные ОУ [27] (необходимо контролировать два процесса с разной динамикой), применяются две сети, отвечающие за процессы нагрева и охлаждения. Для каждого из них необходимо найти свой набор параметров регулятора. В моменты изменения уставки переключатель выбирает сеть, которая будет использоваться далее, исходя из соотношения текущей $r(t)$ и предыдущей r_{old} уставок. База правил определяет, когда и с какой скоростью обучать активную сеть в оперативном режиме.

Далее необходимо определить параметры настройщика для случая адаптации параметров ПИД-регулятора.

2.1. Определение структуры нейронной сети

Структура нейронных сетей (рис. 3) была выбрана в соответствии с методом, приведенным в работе [24] и основанном на теоремах о достаточ-

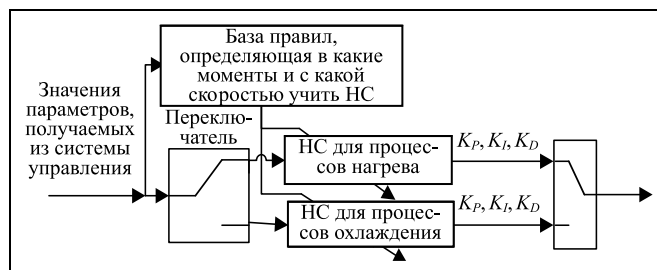


Рис. 2. Нейросетевого настройщик с двумя нейронными сетями (НС)

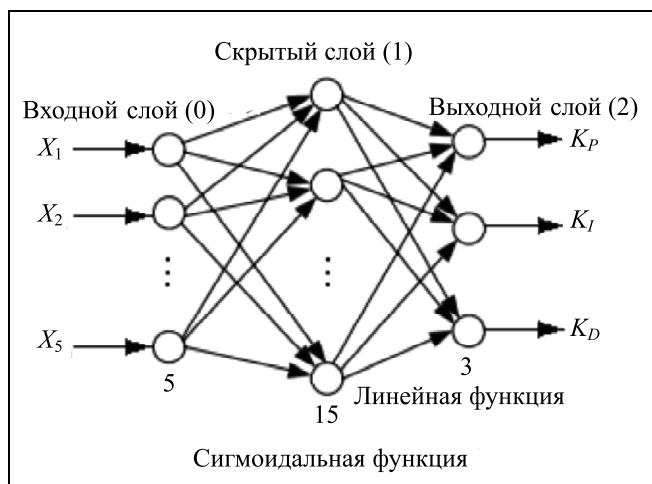


Рис. 3. Выбранная структура нейронных сетей

ности структур сетей. Ее авторами предположено, что настройщик на своих входах должен иметь не меньше данных, чем настраиваемый регулятор. Поэтому в данном случае набор входных нейронов определяется в результате анализа разностного уравнения ПИД-регулятора для ступенчатого графика задания. Выход регулятора зависит от пяти измеряемых величин:

$$u(t_k) = K_p \Delta t r - (K_p + K_I \Delta t + K_D / \Delta t) y(t_k) + (2K_D / \Delta t + K_p) y(t_k - \Delta t) - (K_D / \Delta t) y(t_k - 2\Delta t) + u(t_k - \Delta t).$$

Поэтому входной слой сетей состоит из пяти нейронов ($N_{input} = 5$), в том числе два из них являются задержанными сигналами с выхода ОУ ($N_{delay} = 2$) — значения уставки r (X_1), выхода ОУ $y(t_k)$ (X_2), $y(t_k - \Delta t)$ (X_3) и $y(t_k - 2\Delta t)$ (X_4), выхода ПИД-регулятора $u(t_k - \Delta t)$ (X_5).

Количество скрытых нейронов вычисляется с помощью формулы [24] $N_{hidden} = (2N_{input} + 1) + N_{av} + N_{delay} - 1$, которая основана на анализе теорем R. Hecht-Nielsen [28], G.B. Huang и др. [29], а также учитывает, что выход ОУ усредняется в промышленных системах управления. В данном исследовании число точек усреднения $y(t)$ равно трем ($N_{av} = 3$). Тогда $N_{hidden} = 15$.

2.2. Обучение нейронных сетей

В момент запуска нейросетевого настройщика обучается с помощью метода экстремального обучения [29] таким образом, чтобы выходы нейронных сетей были равны значениям параметров ПИД-регулятора, использовавшимся до установки настройщика с систему управления. После этого



обе сети обучаются оперативно с помощью метода обратного распространения ошибки:

$$\begin{aligned}\Delta \omega_{kj}^{(2)}(t) &= \eta_k^{(2)} e_k O_j^{(1)}, \quad \Delta b_k^{(2)}(t) = \eta_k^{(2)} e_k, \\ k &= \overline{1, 3}, \quad j = \overline{1, 15}, \\ \Delta \omega_{ji}^{(1)}(t) &= \eta^{(1)} \left[\sum_{k=1}^3 e_k \omega_{kj}^{(2)} (dO_j^{(1)} / ds_j^{(1)}) \right] X_i, \\ \Delta b_j^{(1)}(t) &= \eta^{(1)} \left[\sum_{k=1}^3 e_k \omega_{kj}^{(2)} (dO_j^{(1)} / ds_j^{(1)}) \right], \\ j &= \overline{1, 15}, \quad i = \overline{1, 5}.\end{aligned}$$

Каждый выходной нейрон обучается в соответствии со своей ошибкой $e_2(t) = e(t) = r(t) - y(t)$, $e_1(t) = e_2(t) - e_2(t - \Delta t)$ и $e_3 = e_2(t) - 2e_2(t - \Delta t) + e_2(t - 2\Delta t)$ и скоростью обучения $\eta_1^{(2)}, \eta_2^{(2)}, \eta_3^{(2)}$. Скорость обучения нейронов скрытого слоя $\eta^{(1)}$ постоянна, одинакова для всех нейронов и равняется 10^{-5} согласно работе [30], $O_j^{(1)}$ — выход j -го нейрона скрытого слоя, $dO_j^{(1)} / ds_j^{(1)}$ — производная функции активации скрытого слоя. Значения $\eta_1^{(2)}, \eta_2^{(2)}, \eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно базе правил при каждом вызове настройщика.

2.3. База правил для настройки ПИД-регулятора

База правил для настройки П- и ПИ-регуляторов приведена в работе [26]. В данном случае она модифицирована для корректировки сигнала K_p , а кроме того, следствия правил представляют собой эмпирически полученные формулы для вычисления скорости обучения нейронов сети. Это делает данную базу не привязанной к динамике конкретного ОУ.

Основные обозначения: N_n — амплитуда шума, измеренная в установившемся режиме; r и r_{old} — текущее и предыдущее значения задания для контура управления; $K_p \uparrow$ — увеличить K_p ; $K_I \uparrow$ — увеличить K_I ; $K_D \uparrow$ — увеличить K_D ; $K_p \downarrow$ — уменьшить K_p ; $K_D \downarrow$ — уменьшить K_D ; $K_I \downarrow$ — уменьшить K_I ; v_{max} — максимально допустимая скорость изменения $y(t)$ согласно технологической инструкции; $\sigma = 100\% (y_{max} - r(t)) / (r(t) - r_{old})$ — перерегулирование для текущего переходного процесса; $S\%$ — требуемая статическая ошибка; $X\%$ — требуемое значение σ ; y_{max} — амплитуда первого пика переходного процесса. Если скорость изменения выхода ОУ оказалась ниже значения N_n до того, как кривая выхода ОУ в первый раз пересекла задание, то перерегулирование σ приравнивается к нулю.

Настройщик начинает обучение, если значение $u(t)$ находится в допустимых пределах. Если в настоящее время идет переходный процесс и $|e(t)| \geq 0,2|r - r_{old}|$, и $|e(t)| \leq 0,9|r - r_{old}|$, и:

Правило 1: если $|y(t) - y(t - \Delta t)| < N_n$, то $K_p \uparrow$ и $K_D \uparrow$; $\eta_1^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам

$$\begin{aligned}Sp &= (|r(t) - y(t)| / |r(t) - r_{old}|) \times \\ &\times |y(t) - y(t - \Delta t)| / |r(t) - r_{old}|; \\ \eta_1^{(2)} &= K_p(t)Sp, \quad \eta_3^{(2)} = K_D(t)Sp.\end{aligned}\quad (2)$$

Правило 2: если $|y(t) - y(t - \Delta t)| > v_{max}$, то $K_p \downarrow$ и $K_D \downarrow$; $\eta_1^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам

$$\begin{aligned}Sp &= \frac{|r(t) - y(t)|}{N_{hidden}|r(t) - r_{old}|} \cdot \frac{|y(t) - y(t - \Delta t)|}{|r(t) - r_{old}|} \times \\ &\times \frac{|y(t - \Delta t) - y(t - 2\Delta t)|}{|r(t) - r_{old}|}; \\ \eta_1^{(2)} &= K_p(t)Sp, \quad \eta_3^{(2)} = K_D(t)Sp.\end{aligned}$$

Если эти два правила не сработали и $|e(t)| \leq 0,2|r - r_{old}|$, то:

Правило 3: если в момент изменения задания $|e(t)| < S\%|r - r_{old}|$, и система управления устойчива, то текущее значение u сохраняется в специальный массив как эталонное значение u_{et} для данного значения r . Если после этого будет еще один переходный процесс к данной уставке r , и кривые $y(t)$ и r пересекутся в первый раз в течение такого процесса, то извлекается текущее значение сигнала управления из И-канала регулятора u_i . Если $u_i < u_{et}$, то принимается решение $K_I \uparrow$, иначе — $K_I \downarrow$.

Правило 4: если есть решение $K_I \uparrow$, и $\sigma > X\%|r - r_{old}|$, то $K_p \downarrow$, $K_D \downarrow$; $\eta_1^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам (2).

Правило 5: если есть решение $K_I \uparrow$, и $\sigma < X\% \times |r - r_{old}|$, и $e(t) > S\%|r - r_{old}|$, и $|y(t) - y(t - 2\Delta t)| < N_n$, то $K_I \uparrow$, $K_D \uparrow$; $\eta_2^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам

$$\begin{aligned}Sp &= \left(\frac{|r(t) - y(t)|}{|r(t) - r_{old}|} - S\% / 100\% \right) \cdot \frac{|y(t) - y(t - \Delta t)|}{|r(t) - r_{old}|} \times \\ &\times \frac{|y(t - \Delta t) - y(t - 2\Delta t)|}{|r(t) - r_{old}|}; \\ \eta_2^{(2)} &= K_I(t)Sp, \quad \eta_3^{(2)} = K_D(t)Sp.\end{aligned}\quad (3)$$

Правило 6: если есть решение $K_I \downarrow$, и $e(t) > S\%|r - r_{old}|$, и $|y(t) - y(t - 2\Delta t)| > N_n$, то

$K_P\downarrow$, $K_D\downarrow$; $\eta_2^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам (3).

Правила 1–6 можно описать таким образом. Переходный процесс делится на две части для анализа. Если он завершен минимум на 10 %, но не более чем на 80 %, то рассматривается скорость переходного процесса. Если она выше или ниже допустимой, то корректируются значения K_P и K_D в сторону уменьшения или увеличения соответственно для придания переходному процессу необходимой динамики. Если кривая выхода ОУ уже пересекла кривую задания в первый раз и возникло недопустимое перерегулирование, то причиной этого может быть избыточное значение как K_P , так и K_I . Поэтому используется указанный выше массив для однозначного ответа на данный вопрос. При возникновении статической ошибки необходимо увеличивать значение K_I .

Эти правила подходят для процессов нагрева. Для процессов охлаждения разработан следующий набор правил (из предыдущего набора используются правила 3, 5 и 6).

Правило 7: если $|y(t) - y(t - \Delta t)| < N_n$, и $|e(t)| > S\%|r - r_{old}|$, и кривая $y(t)$ еще не пересекла кривую r , то $K_I\uparrow$, $K_D\uparrow$; $\eta_2^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам (3).

Правило 8: если кривая $y(t)$ уже пересекла кривую r , и $y(t) > r$, и $|e(t)| > S\%|r - r_{old}|$, то $K_P\downarrow$, $K_D\downarrow$; $\eta_1^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам

$$Sp = (|r(t) - y(t)|/|r(t) - r_{old}| - S\%/100\%) \times |y(t) - y(t - \Delta t)|/|r(t) - r_{old}|;$$

$$\eta_1^{(2)} = K_P(t)Sp, \quad \eta_3^{(2)} = K_D(t)Sp. \quad (4)$$

Правило 9: если кривая $y(t)$ уже пересекла кривую r , и $|e(t)| > X\%|r - r_{old}|$, то $K_P\downarrow$, $K_D\downarrow$; $\eta_1^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам

$$Sp = (|r(t) - y(t)|/|r(t) - r_{old}| - X\%/100\%) \times |y(t) - y(t - \Delta t)|/|r(t) - r_{old}|;$$

$$\eta_1^{(2)} = K_P(t)Sp, \quad \eta_3^{(2)} = K_D(t)Sp. \quad (5)$$

Правило 10: если есть решение $K_P\downarrow$ и $\sigma > X\%|r - r_{old}|$, и $e(t) > S\%|r - r_{old}|$, и $|y(t) - y(t - 2\Delta t)| < N_n$, то $K_P\uparrow$, $K_D\uparrow$; $\eta_1^{(2)}$ и $\eta_3^{(2)}$ вычисляются согласно формулам (5).

Особенность этого набора правил заключается в том, что в данном случае значение сигнала управления ограничено снизу нулевым значением, а максимально возможная скорость остывания оп-

ределяется отдачей тепла печью во внешнюю среду. Поэтому в случае нулевого перерегулирования по итогам переходного процесса производится увеличение значения K_P , а не K_I (что привело бы к тому, что к моменту достижения задания в И-канале регулятора остался бы избыточный сигнал управления, который затем отбросил бы выход ОУ обратно в сторону увеличения температуры). При наличии перерегулирования производится корректировка K_P .

Скорость обучения $\eta_k^{(2)}$, рассчитанная по правилам, может быть слишком большой для текущего состояния ОУ. Это может привести к его неустойчивости. Данная ситуация предотвращается с помощью разработанного критерия устойчивости (см. далее § 3).

2.4. Промежуток времени между последовательными вызовами нейросетевого настройщика

Как уже упоминалось, настройщик вызывается один раз в Δt секунд. Метод расчета значения Δt предложен в работе [24]. Он основан на теореме G. В. Huang и др. [29] и том факте, что настройщик применяется к уже функционирующему агрегату. Таким образом, известно время переходных процессов для данного графика заданий для текущих параметров ПИД-регулятора. Это время усредняется для последовательности рассматриваемых уставок и делится на N_{hidden} для получения значения Δt .

3. ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С НАСТРОЙЩИКОМ

Способ оценки устойчивости системы управления (см. рис. 1), но в случае применения П- или ПИ-регуляторов, предложен в работе [25]. Он основан на применении второго метода Ляпунова. Предполагается дискретно вычислять выбранную функцию Ляпунова и ее производную. На этой основе вычисляется максимально допустимое значение скорости обучения $\eta_{kmax}^{(2)}$ нейронов выходного слоя. Для применения данного метода к системе на основе ПИД-регулятора в первую очередь необходимо модифицировать функцию Ляпунова, приведя ее к виду

$$V(E) = 0,5 \sum_{i=1}^3 e_i^2(t) = 0,5(e_1^2(t) + e_2^2(t) + e_3^2(t)),$$

и получить выражение для ее производной в дискретном виде

$$\Delta V = \frac{1}{\Delta t} \sum_{i=1}^3 \Delta e_i(t)e_i(t) + \frac{1}{2\Delta t} \sum_{i=1}^3 \Delta e_i^2(t). \quad (6)$$

Все значения e_i и Δe_i могут быть вычислены, используя значения $r(t)$ и $y(t)$. Поэтому выражение (6) для случая ступенчатого изменения задания записывается в виде

$$\Delta V(t) = \frac{1}{2\Delta t} [9y^2(t) + 30y^2(t - \Delta t) + 16y^2(t - 2\Delta t) + y^2(t - 3\Delta t) + y(t)(-30y(t - \Delta t) + 18y(t - 2\Delta t) - 4y(t - 3\Delta t)) + y(t - \Delta t)(-42y(t - 2\Delta t) + 10y(t - 3\Delta t)) + y(t - 2\Delta t)(-8y(t - 3\Delta t)) + 2r(t)(y(t - \Delta t) - y(t))] \leq 0.$$

Это выражение позволяет проверять выполнение достаточного критерия устойчивости каждые Δt секунд, т. е. при каждом вызове настройщика. Более того, его можно рассматривать как неравенство, где $y(t)$ — переменная. Зная действительное значение $y(t)$ и, решив это неравенство, желаемое значение выхода ОУ $y_{st}(t)$ [25], при котором система управления была бы устойчива в текущий момент времени, вычисляются максимально допустимые поправки для K_p , K_I и K_D : $\Delta K_p \leq (y_{st}(t) - y(t)) (K_p + K_D/\Delta t)/e(t)$, $\Delta K_I \leq (y_{st}(t) - y(t)) (K_p + K_D/\Delta t)/(e(t)\Delta t/dt)$, $\Delta K_D \leq (y_{st}(t) - y(t)) (K_p + K_D/\Delta t)/(e(t) - e(t - \Delta t))$. Здесь dt — интервал дискретизации работы центрального процессора программируемого логического контроллера (ПЛК), в рамках которого реализован ПИД-регулятор.

С помощью математической модели метода обратного распространения ошибки, выражений для ΔK_p (ΔK_I), ΔK_I (ΔK_2), ΔK_D (ΔK_3) и учитывая результаты, приведенные в работе [25], было получено выражение для вычисления максимально допустимой в данный момент скорости обучения нейронного выходного слоя $\eta_{k\max}^{(2)}$ нейронной сети настройщика:

$$\eta_{k\max}^{(2)} = \Delta K_k / \left[e_k^2 \left(\sum_{j=1}^{15} ((O_j^{(1)})^2 + 1) \right) \right], \quad k = \overline{1, 3}.$$

Выбор скорости обучения для текущего вызова настройщика ведется согласно выражению

$$\begin{cases} \eta_k^{(2)} = 0, \text{ если } \Delta V \geq 0 \text{ и } (K_p \text{ и } K_D) \text{ или } (K_I \text{ и } K_D) \text{ следует увеличивать,} \\ \eta_k^{(2)} = \eta_{k\max}^{(2)}, \text{ если } \Delta V \geq 0 \text{ и } (K_p \text{ и } K_D) \text{ или } (K_I \text{ и } K_D) \text{ следует снижать,} \\ 0 \leq |\eta_k^{(2)}| \leq |\eta_{k\max}^{(2)}| \text{ для всех остальных случаев.} \end{cases} \quad (7)$$

Далее были проведены численные и натурные эксперименты на типовой нагревательной печи.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

4.1. Численные эксперименты

Математические модели электронагревательной печи СНОЛ-1,6,2,5.1/11-И4 — типового теплотехнического агрегата — были применены для проведения экспериментов. Печь была идентифицирована в двух состояниях: пустая печь (8) и загруженная на 20–25 % по массе стальной литой заготовкой (9), поскольку такой перепад по массе загрузки типичен для, например, нагревательных печей прокатного производства в металлургии:

$$W_{un}(s) = \frac{20,72}{1336s + 1} \cdot \frac{1}{69,4s + 1} e^{-64s}, \quad (8)$$

$$W_{ld}(s) = \frac{20,72}{2683s + 1} \cdot \frac{1}{35s + 1} e^{-90s}. \quad (9)$$

Идентификация осуществлена в лабораторных условиях только для проведения численных экспериментов. В условиях производства она трудноосуществима.

Для моделирования в Matlab была реализована модель системы управления (рис. 4). Здесь Subsystem — ПИД-регулятор, Saturation — блок ограничения управляющего воздействия в интервале $[0, 100]$, Sysysyst — модель ОУ вида (1), Subsystem1 — подсистема формирования входных сигналов для настройщика, S-Function — реализация нейросетевого настройщика. При этом параметры полученных моделей были неизвестны настройщику.

Цикл изменения значения уставки был определен следующим образом: переход от 590 до 640 °С, затем до 505 °С и назад до 590 °С. Такой график — это уменьшенный в 1,8 раза график изменения уставок для одной из зон печей нагрева металла перед прокатом АО «Оскольский электрометаллур-

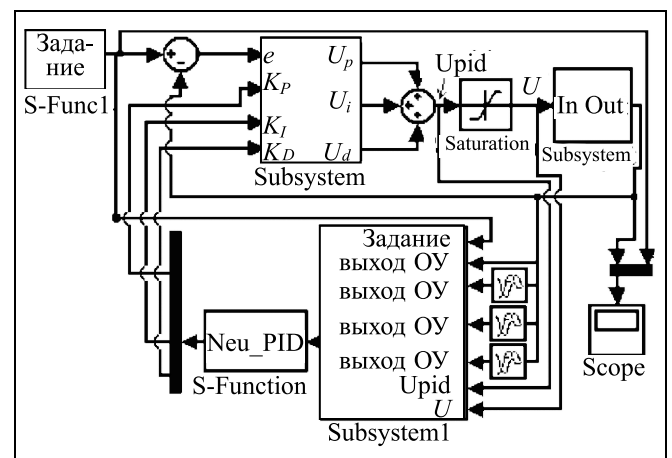


Рис. 4. Модель системы управления в Matlab

гический комбинат». Требуемое качество переходных процессов определено как $X\% = S\% = \sigma_{\max} = 100\% \cdot (y_{\max} - r(t)) / (r(t) - r_{old}) = 5\%$. Если значение $S\%$ было ниже 5% от $(r(t) - r_{old})$ в течение 30 мин, то значение уставки изменялось согласно описанному выше графику. Начальные значения для K_p , K_I и K_D были определены для переходного процесса 505—590 °С для модели пустой печи

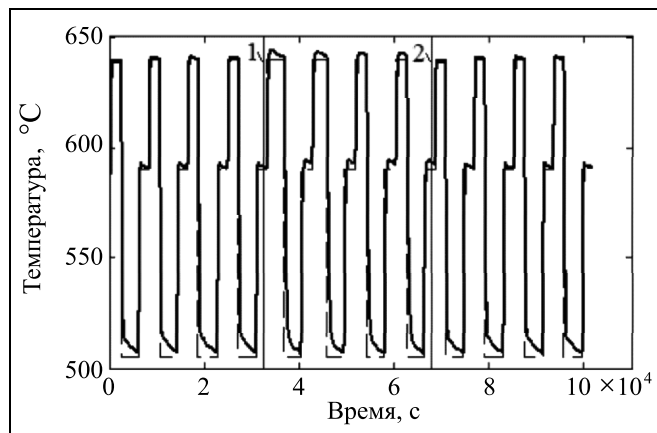


Рис. 5. Результаты применения ПИД-регулятора в рамках численного эксперимента

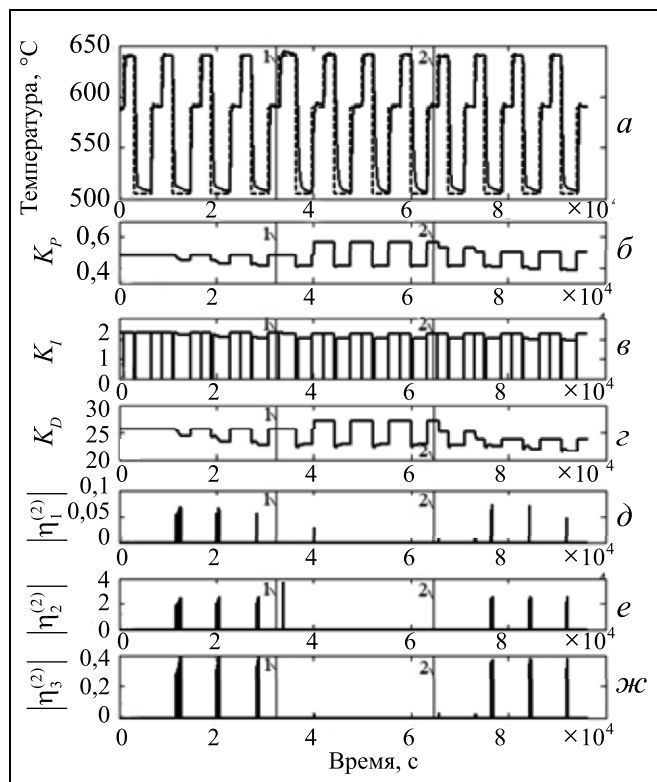


Рис. 6. Результаты для нейросетевого настройщика в рамках численного эксперимента

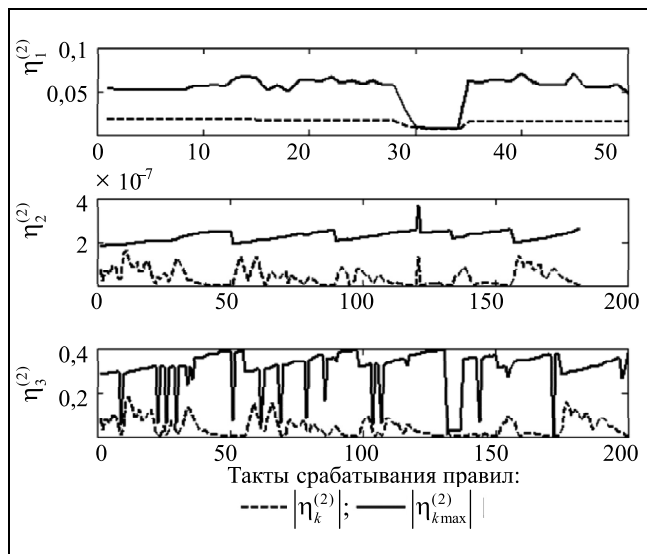


Рис. 7. Абсолютные значения скоростей обучения нейронов выходного слоя НС (численный эксперимент)

таким образом, чтобы удовлетворить требованию $X\% = S\% = \sigma_{\max} = 5\%$, — $K_p = 0,48$; $K_I = 0,00023$; $K_D = 25,6$.

Результаты, полученные для систем с ПИД-регулятором и нейросетевым настройщиком, представлены на рис. 5 и 6 соответственно (здесь и далее: линия 1 — переключение на модель загруженной печи, линия 2 — переключение на модель пустой печи).

Уровень перерегулирования превышал $X\%$ для системы с ПИД-регулятором (см. рис. 5) в те моменты, когда применялась модель загруженной печи. Это привело к более длительным переходным процессам по сравнению с системой на основе нейросетевого настройщика (рис. 6, а). Он изменял параметры K_p (рис. 6, б), K_I (рис. 6, в), K_D (рис. 6, г), чтобы поддерживать требуемое качество переходных процессов.

Кривые для скорости обучения, вычисленной по правилам, $\eta_k^{(2)}$ и максимально допустимой скорости $\eta_{k\max}^{(2)}$, $k = 1, 2, 3$, для нейронов выходного слоя приведены на рис. 6, д, 6, е и 6, ж. Большую часть времени все эти значения равнялись нулю. Исключив все такие моменты из этих рисунков, получим кривые, которые показаны на рис. 7. В большинстве случаев справедливо $|\eta_{k\max}^{(2)}| > |\eta_k^{(2)}|$. В целом, скорость для обучения выбиралась согласно выражению (7). Это позволило обеспечить устойчивость системы управления. Сводные данные по эксперименту приведены в табл. 1.

В сходном эксперименте, но с ПИ-регулятором, в работе [26] были получены следующие результаты. Время опыта: с настройщиком — 27,88 ч, с ПИ-регулятором — 30,86 ч; время переходных процессов: с настройщиком — 9,88 ч, с ПИ-регулятором — 12,86 ч; суммарное управление: с настройщиком — 2 762 413 ед., с ПИ-регулятором — 3 108 236 ед. Таким образом, использование Д-канала в регуляторе для обеих систем управления (и с настройщиком, и без него) позволило уменьшить как время опыта и переходных процессов, так и суммарное управление относительно соответствующего опыта с ПИ-регулятором.

Однако в данном опыте производилось переключение между двумя, по сути, линейными моделями ОУ. Реальные печи нагрева нелинейные. Поэтому был проведен эксперимент на самой печи, для которой были получены данные модели.

4.2. Натурные эксперименты

Настройщик был реализован с помощью языка Structured Text в виде функционального блока FB. Этот язык поддерживается большинством производителей ПЛК. В данной работе использовался контроллер S7-300 с центральным процессором 314-2DP, широко применяемый в различных отраслях промышленности. Упомянутый функциональный блок с настройщиком был интегрирован в память ПЛК и занимал 32 КБ. Для реализации ПИД-регулятора использовался стандартный блок FB58. Выходы настройщика записывались в ячейки памяти ПЛК, из которых FB58 считывал K_p , K_I , K_D .

Эксперименты проводились на электронагревательной печи СНОЛ-1,6,2,5,1/11-И4 — типовом теплотехническом агрегате. Организация системы управления печью показана на рис. 8.

График изменения задания соответствовал численным экспериментам. В ходе каждого эксперимента было проведено 36 переходных процессов: двенадцать — с пустой печью, затем двенадцать — с печью, загруженной стальной литой заготовкой объемом 20–25 % от внутреннего объема печи,

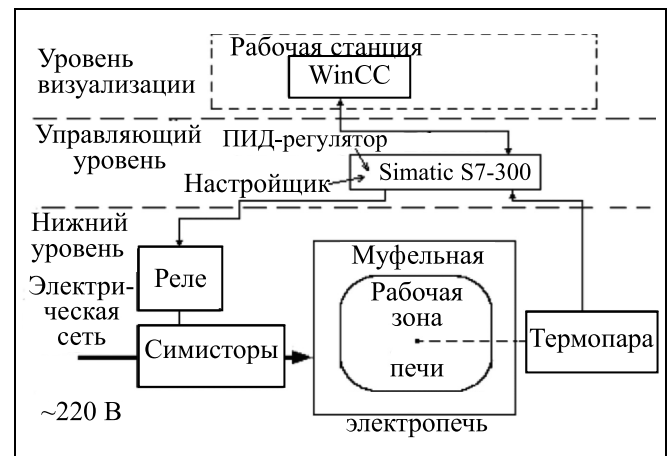


Рис. 8. Реализация системы управления печью

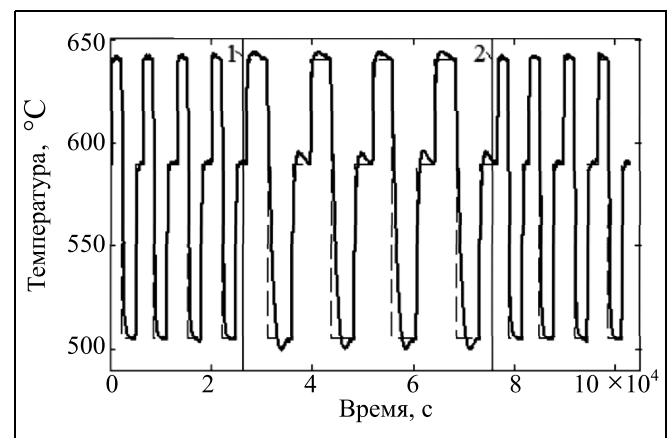


Рис. 9. Результаты применения ПИД-регулятора в рамках натурального эксперимента

после этого — двенадцать переходных процессов с пустой печью. Требуемое качество переходных процессов соответствовало численным экспериментам. Начальные значения для K_p , K_I и K_D были определены для переходного процесса 505–590 °C для пустой печи таким образом, чтобы удовлетворять требованию $X\% = S\% = \sigma_{\max} = 5\%$, — $K_p = 1,2$; $K_I = 0,0024$; $K_D = 18$. Результаты, полученные для систем с ПИД-регулятором и настройщиком, представлены на рис. 9 и 10 соответственно.

Анализ данных графиков позволяет сделать вывод о том, что полученные результаты, в целом, совпадают с результатами численных экспериментов. Кривые для скорости обучения $\eta_k^{(2)}$, вычисленной правилами, и максимально допустимой скорости $\eta_{k\max}^{(2)}$, $k = 1, 2, 3$, для нейронов выходного слоя приведены на рис. 10, д, 10, е и 10, ж.

Таблица 1

Результаты численных экспериментов

Показатель	ПИД-регулятор	Нейросетевой настройщик	Экономия по показателю, %
Время эксперимента, ч	28,29	26,55	6,2
Время переходных процессов, ч	10,29	8,55	16,9
Суммарное управление, ед.	2 832 511	2 571 117	9,2

Исключая моменты времени, когда скорости равны нулю, получаем кривые, приведенные на рис. 11.

Анализ данных кривых вновь позволяет утверждать, что критерий (7) позволил обеспечить устойчивость системы управления.

Результаты всех натурных экспериментов также приведены в табл. 2.

В сходном эксперименте, но с ПИ-регулятором, в работе [24] были получены следующие ре-

Таблица 2

Результаты натурных экспериментов

Показатель	ПИД-регулятор	Нейросетевой настройщик	Экономия по показателю, %
Время эксперимента, ч	28,66	27,42	4,3
Время переходных процессов, ч	10,66	9,42	11,6
Расход электроэнергии, кВт·ч	17,48	16,02	8,4

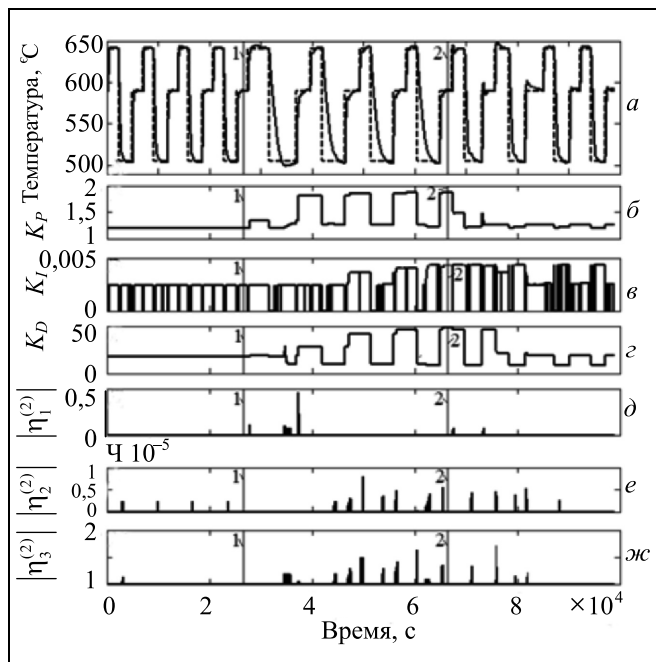


Рис. 10. Результаты применения настройщика в рамках натурального эксперимента

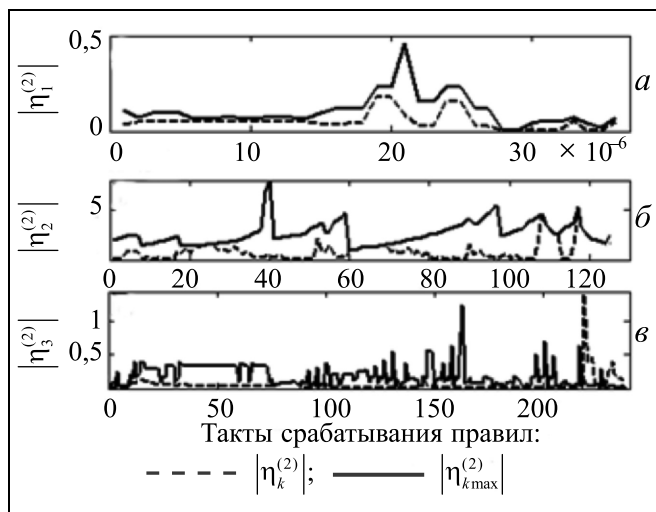


Рис. 11. Абсолютные значения скоростей обучения нейронов выходного слоя НС

зультаты. Время опыта: с настройщиком — 29,08 ч, с ПИ-регулятором — 37,7 ч; время переходных процессов: — с настройщиком — 11,88 ч, с ПИ-регулятором — 19,7 ч. Что касается энергопотребления для опытов с ПИ-регулятором, то его сравнение с экспериментами с ПИД-регулятором является некорректным, поскольку опыты проводились с разницей практически в четыре года, при этом печь использовалась достаточно интенсивно, что привело к сильному износу футеровки. Поэтому был сделан вывод только о том, что Д-канал позволил уменьшить время переходных процессов.

В целом, анализируя результаты всех экспериментов, отметим, что при постоянной загрузке печи в течение 12 переходных процессов параметры ПИД-регулятора устанавливаются на постоянных значениях. Это означает, что настройщик сумел подобрать для каждого из двух имеющихся режимов необходимые для обеспечения требуемого качества переходных процессов значения параметров ПИД-регулятора. В дальнейшем настройщик можно отключить и просто переключаться между ними, реализуя стратегию табличной адаптации (gain scheduling) [31]. Однако для реальных производственных процессов, протекающих в промышленных печах (например, металлургических), применение данной стратегии затруднено, поскольку число возможных режимов достаточно сложно определить заранее. Например, загрузка печи металлом даже одной и той же марки отличается по массе от плавки к плавке. Также необходимо учитывать дрейф параметров ОУ и влияние соседних зон для многозонных печей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нейросетевой настройщик был усовершенствован таким образом, чтобы он мог подстраивать параметры ПИД-регуляторов. Для этого была выбрана структура нейронной сети (5-15-3) на основе анализа разностного уравнения такого регулято-



ра. Также доработана база правил, а для следствий правил определены эмпирические формулы расчета скорости обучения. Получен критерий устойчивости системы управления с настройщиком для случая подстройки ПИД-регуляторов в условиях ступенчатого изменения уставки.

Новая версия настройщика была применена для управления печью нагрева с нестационарными параметрами, в которую производилась загрузка стальной заготовки. Это для натуральных экспериментов позволило сократить время переходных процессов на 11,6 % и энергопотребление на 8,4 % по сравнению с обычным ПИД-регулятором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Berner J., Soltesz K., Hagglund T., Astrom K.J. An experimental comparison of PID autotuners // *Control Engineering Practice*. — 2018. — Vol. 73. — P. 124–133.
2. Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах // *Автоматика и телемеханика*. — 2014. — № 2. — С. 16–30.
3. Astrom K.J., Hagglund T. *Advanced PID control*. — Research Triangle Park: ISA, 2006. — 461 p.
4. Aschepkov L.T., Dolgy D.V., Kim T., Agarwal R.P. Optimal control. — N.-Y.: Springer, 2016. — 209 p.
5. Хлебников М.В., Шербаков П.С., Честнов В.Н. Задача линейно-квадратичного управления: I. Новое решение // *Автоматика и телемеханика*. — 2015. — № 12. — С. 65–79.
6. Краснова С.А., Мысык Н.С. Каскадный синтез наблюдателя состояния с нелинейными корректирующими воздействиями // *Автоматика и телемеханика*. — 2014. — № 2. — С. 106–128.
7. Салихов З.Г., Арунянц Г.Г., Рутковский А.Л. Системы оптимального управления сложными технологическими объектами. — М.: Теплоэнергетик, 2004. — 496 с.
8. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. — М.: Машиностроение. — 1974. — 329 с.
9. Яковис Л.М., Спорягин К.В. Расчет регуляторов для инерционных объектов с запаздыванием // *Автоматизация в промышленности*. — 2009. — № 12. — С. 21–25.
10. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во МЭИ, 2008. — 396 с.
11. Ротач В.Я., Кузицин В.Ф., Петров С.В. Настройка регуляторов по переходным характеристикам систем автоматического управления с использованием преобразования Фурье // *Автоматизация в промышленности*. — 2010. — № 1. — С. 14–18.
12. Ribeiro J.M.S., Santos M.F., Carmo M.J., Silva M.F. Comparison of PID controller tuning methods: analytical/classical techniques versus optimization algorithms // *Proc. of 2017 18th International Carpathian Control Conference (ICCC)*. — IEEE; 2017. — P. 533–538.
13. Шубладзе А.М., Гуляев С.В., Малахов В.Р., Ольшванг В.Р. Адаптивный ПИД-регулятор // *Датчики и системы*. — 2008. — № 1. — С. 20–23.
14. Pfeiffer B.-M. Towards «plug and control»: self-tuning temperature controller for PLC // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. — 2000. — № 14. — P. 519–532.
15. Александров В.А., Паленов М.В., Шатов Д.В. Частотное адаптивное управление процессом бурения // *Проблемы управления*. — 2016. — № 2. — С. 41–48.
16. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. Сер. Анализ и синтез нелинейных систем. — СПб.: Наука, 2000. — 549 с.
17. Шпилевая О.Я. Формирование управляющих воздействий в системах прямого адаптивного управления // *Автоматизация*. — 2009. — Т. 45, № 5. — С. 90–102.
18. Calvo-Rolle J.L., Casteleiro-Roca J.L., Quintián H., et al. A hybrid intelligent system for PID controller using in a steel rolling process // *Expert Systems with Applications*. — 2013. — Vol. 40, № 13. — P. 5188–5196.
19. Васильев С.Н., Кудинов Ю.И., Пащенко Ф.Ф. и др. Интеллектуальные системы управления и нечеткие регуляторы. Ч. 1. Нечеткие модели, логико-лингвистические и аналитические регуляторы // *Датчики и системы*. — 2017. — № 1. — С. 4–19.
20. Chen J., Huang T. Applying neural networks to on-line updated PID controllers for nonlinear process control // *Journal of Process Control*. — 2004. — N 14. — P. 211–230.
21. Erenoglu I., Eksin I., Yesil E., et al. An intelligent hybrid fuzzy PID controller // *European Conference on Modelling and Simulation*. — Bonn: European Council for Modelling and Simulation, 2006. — P. 62–67.
22. Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. М. — М.: Физматлит, 2001. — 576 с.
23. Рыбин В.М., Самхарадзе Т.Г., Шербаков Н.С. Применение динамических интегрированных экспертных систем для интеллектуального управления // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. — 2012. — № 4. — С. 29–32.
24. Еременко Ю.И., Глущенко А.И. О разработке метода выбора структуры нейронной сети для решения задачи адаптации параметров линейных регуляторов // *Управление большими системами*. — 2016. — Вып. 62. — С. 75–123.
25. Глущенко А.И. О методе определения скорости обучения нейронной сети для задачи оперативной настройки линейных регуляторов при управлении нелинейными объектами // *Управление большими системами*. — 2018. — Вып. 72. — С. 52–107.
26. Еременко Ю.И., Полещенко Д.А., Глущенко А.И. О применении нейросетевого оптимизатора параметров ПИ-регулятора для управления нагревательными печами в различных режимах работы // *Управление большими системами*. — 2015. — Вып. 56. — С. 143–175.
27. Wei M., Luo X., Feng A. Predictive controller for nonlinear unsymmetrical systems based on control performance comparison // *CIESC Journal*. — 2012. — Vol. 63 (10). — P. 3183–3189.
28. Hecht-Nielsen R. Kolmogorov's Mapping Neural Network Existence Theorem // *Proc. Int. Conf. Neural Networks*. — N.-Y.: IEEE Press, 1987. — Vol. III. — P. 11–14.
29. Huang G.B., Zhou H., Ding X., Zhang R. Extreme learning machine for regression and multiclass classification // *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. — 2012. — Vol. 42 (2). — P. 513–529.
30. Omatu S., Khalid M., Rubiaiyah Y. *Neuro-Control and Its Applications*. — London: Springer, 1996. — 255 p.
31. Astrom K.J., Wittenmark B. *Adaptive Control*. — N.-Y.: Dower Publications, 2008. — 573 p.

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

Глущенко Антон Игоревич — канд. техн. наук, доцент, Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС», ✉ a.glushchenko@sf-misis.ru.

Поступила в редакцию 06.08.2018, после доработки 17.09.2018.

Принята к публикации 17.10.2018.

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О ВЫБОРЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В ГРУППЕ¹

Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз

Рассмотрена задача выбора образца автономного необитаемого подводного аппарата среди множества типов существующих подводных аппаратов для группового их применения. В отличие от выбора конкретного образца аппарата по результатам вклада его в эффективность функционирования группы, предложен подход, учитывающий также и способ организации аппаратов в группе. Разработана математическая модель функционирования группы, при формировании показателя эффективности применена нечеткая логика. На примере решения задачи обследования акватории рассмотрены различные варианты организации аппаратов в группе (шеренга, рой, стая, мультиагентная система). Результаты численного эксперимента показали целесообразность учета не только индивидуального вклада каждого аппарата в эффективность группы, но и способ организации аппаратов в группе.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, надежность, эффективность, принятие решения, нечеткая логика.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) привело к созданию многочисленных аппаратов, отличающихся габаритными, скоростными, маневренными, глубоководными и прочими характеристиками. В результате для решения конкретной задачи, например, обследования акватории, из всего многообразия образцов АНПА необходимо выбрать наиболее подходящий. Решение о выборе наиболее подходящего образца принимается по результатам сравнительной оценки эффективности выполнения задачи различными образцами АНПА. Эффективность выполнения задачи может определяться, например, временем осмотра заданного района: чем

меньше затрачиваемое на осмотр заданного района время, тем выше эффективность.

Имеющиеся фундаментальные подходы к принятию решения [1–3] относительно выбора одного АНПА заключаются в сравнительном анализе работы двух конкурирующих образцов АНПА. По результатам оценки выполнения поставленной задачи двумя альтернативными вариантами АНПА принимается решение о выборе наиболее подходящего из них. По сути, сравнение происходит по эффективности функционирования АНПА, и решение принимается путем выбора одной из конкурирующих гипотез.

Однако в последнее время все чаще возникают задачи группового применения АНПА [4–13]. И в этом случае оценка эффективности выполнения поставленной задачи группой АНПА, например, обследования той же территории, дает возможность оценить преимущество выполнения поставленной задачи группой, но не отдельно взятым аппаратом. Для выбора конкретного наиболее эф-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-08-00666, № 19-08-00253).



эффективного образца АНПА необходим переход от эффективности группового применения АНПА к эффективности одного аппарата из состава группы.

Противоречивость задачи выбора АНПА в этом случае заключается в том, что, с одной стороны, необходимо выбрать конкретный образец одиночного аппарата, а с другой стороны, группа выбранных образцов АНПА должна наиболее эффективно решать поставленную задачу в целом. Для разрешения противоречия необходимо обоснованно оценить вклад одиночного аппарата в эффективность выполнения группой, и на основе этого вклада принимать решение по выбору конкретного образца аппарата.

Однако эффективность функционирования группы АНПА определяется не только эффективностью каждого аппарата, но и, в силу «интеллекта» и возможности общения АНПА между собой, способом организации аппаратов в группе.

Поэтому имеющиеся подходы к оценке эффективности залпового применения нескольких образцов техники [14, 15], которые функционируют независимо друг от друга и не учитывают управление в группе, не могут быть применены для АНПА.

Использованию интеллекта и взаимодействию образцов техники при групповом их применении в литературе уделено достаточно внимания, например, применительно к беспилотным летательным аппаратам и космическим аппаратам [16, 17]. В этих и подобных работах основное внимание уделено рассмотрению технологий построения прикладных систем группового управления, состоящих из большого числа автономных подсистем, организованных в сеть, узлы которой могут работать под управлением различных операционных систем и в различных коммуникационных средах.

Однако предлагаемые в литературе подходы не могут быть применены для морской среды, поскольку:

- в морской среде отсутствует навигация по спутниковым радионавигационным системам;
- подводная среда оказывает существенное влияние на функционирование АНПА;
- имеются ограничения на дальность связи и объем передаваемой информации.

Поэтому принятие решения относительно выбора АНПА с учетом их взаимодействия в группе требует иного подхода.

Цель настоящей работы состоит в разработке подхода к принятию решения о выборе АНПА с учетом особенностей организации аппаратов в группе и функционирования группы аппаратов в морской среде.

При разработке подхода последовательно рассмотрены:

- формирование вероятности выполнения задачи одиночным АНПА с учетом особенностей морской среды;
- подходы к принятию решения о выборе АНПА без учета взаимодействия аппаратов в группе — на основе эффективности функционирования группы аппаратов с учетом традиционных подходов и влияния особенностей морской среды;
- особенности взаимодействия аппаратов в группе при выполнении поставленной задачи при различных способах организации группы;
- оценки эффективности группового применения аппаратов при различных способах организации группы.

В результате выработан подход к принятию решения о выборе образца АНПА, который удовлетворяет всем заданным требованиям и обеспечивает, с одной стороны, эффективное функционирование группы, а с другой — возможность принятия решения о выборе конкурентного образца АНПА.

Формирование подхода к принятию решения о выборе АНПА проиллюстрируем на примере решения группой аппаратов широко распространенной задачи обследования акватории.

1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДИНОЧНОГО АППАРАТА

Вероятность выполнения поставленной перед АНПА задачи определяется произведением показателей его надежности P_n и эффективности P_3 :

$$P = P_n P_3. \quad (1)$$

Для эффективного выполнения сложных заданий в различных условиях, в том числе непредсказуемых [18] и аварийных, требуются высоконадежные АНПА, способные сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции, прежде всего, в заданных режимах и условиях применения [19].

Под эффективностью функционирования каждого j -го АНПА из группы, $j = 1, \dots, K$, будем понимать вероятность P^j обследования заданного района в ограниченный период времени. Наряду с эффективностью функционирования АНПА учитывается также и его надежность, поскольку обеспечение той или иной степени надежности АНПА позволяет достичь соответствующей эффективности. Эффективность АНПА — это его свойство давать полезный эффект (результат) при эксплуатации и, прежде всего, при его непосредственном использовании по назначению в сопоставлении с эффектом, принятым за образец сравнения [20].

Надежность АНПА представляет собой его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения.

Вероятность выполнения j -м АНПА предписанных ему функций определяют вероятности:

- удержания аппарата на заданной маршрутной траектории $P_{\text{УМ}}^j$;
- обнаружения препятствий $P_{\text{ОП}}^j$;
- безаварийного огибания препятствия $P_{\text{П}}^j$;
- возвращения аппарата на заданную маршрутную траекторию после огибания препятствия (маршрут после препятствия) $P_{\text{ПМ}}^j$;
- прибытия аппарата в окрестность каждой маршрутной точки $P_{\text{ЦТ}}^j$;
- обнаружения объекта поиска $P_{\text{ОБ}}^j$;
- возвращения аппарата в конечную точку $P_{\text{КТ}}^j$;
- посадки аппарата на причальное устройство $P_{\text{ПУ}}^j$.

Поэтому вероятность выполнения j -м АНПА предписанных ему функций может быть записана в виде:

$$P^j = P_{\text{УМ}}^j P_{\text{ОП}}^j P_{\text{П}}^j P_{\text{ПМ}}^j P_{\text{ЦТ}}^j P_{\text{ОБ}}^j P_{\text{КТ}}^j P_{\text{ПУ}}^j, \quad j = 1, \dots, K, \quad (2)$$

где K — число аппаратов в группе.

Вероятность удержания АНПА на заданной маршрутной траектории $P_{\text{УМ}}^j$, смещаемого в результате воздействия возможных течений, водоворотов и др., определяется его маневренными характеристиками, которые зависят от параметров движения, технических и гидродинамических возможностей АНПА. Гидродинамические особенности морской среды (вязкость, плотность, температура) оказывают существенное влияние на инерционные свойства аппарата.

Вероятность корректировки собственного положения АНПА определяется алгоритмами и его маневренными параметрами и параметрами морской среды (вязкостью).

Вероятность $P_{\text{П}}^j$ обнаружения объектов и препятствий, их классификация и оценка их параметров зависят от способности применяемых в АНПА гидроакустических средств освещения окружающей обстановки. Эта способность характеризуется:

- вероятностью обнаружения объекта на фоне окружающей среды в условиях рефракции звуковых лучей, шумов моря, переотражения и прелом-

ления лучей, реверберации объемной и граничной (донной и поверхностной);

- вероятностью правильного планирования обхода препятствия по оптимальной траектории с учетом гидродинамических ограничений на маневр АНПА;

- текущими возможностями АНПА огибания препятствия.

Вероятность достаточности энергоресурса, на расход которого оказывает влияние также гидродинамические особенности морской среды, определяется отношением оставшегося энергоресурса к необходимому для завершения выполнения поставленной задачи.

Число решаемых задач может отличаться от числа перечисленных выше, поэтому в дальнейшем для общности будем полагать, что число таких задач N .

С учетом выражения (2) итоговая вероятность выполнения поставленной перед АНПА задачи представляет собой мультипликативную свертку вероятностей выполнения частных задач в предположении независимости их выполнения, и формула (1) принимает вид:

$$P = P_{\text{н}} \prod_{i=1}^N P_i,$$

где P_i — вероятность выполнения i -й задачи, N — число промежуточных задач, решение которых оказывает влияние на конечный результат при условии независимости решения каждой i -й задачи.

2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ АППАРАТОВ БЕЗ УЧЕТА ИХ ОРГАНИЗАЦИИ В ГРУППЕ

Традиционно решение о превосходстве одного образца АНПА над другим принимается в результате сравнительного анализа двух образцов АНПА. Образцы техники сравниваются в результате рассмотрения решения поставленной задачи при залповом их применении. По аналогии, будем сравнивать образцы АНПА путем оценки эффективности решения поставленной перед группой АНПА задачи, например, задачи обследования заданного района.

Для обследования района в АНПА вводится маршрутное задание с указанием маршрутных точек, в которых он должен быть в определенные моменты времени. Однако при выполнении задания возникает ряд случайных факторов, которые оказывают влияние на результат выполнения задания, например:

- течение, приводящее к отклонению от маршрутной траектории;



— условия, ухудшающие информационный взаимодействие;

— препятствия и другие факторы, приводящие к аварийной ситуации.

Поэтому заранее прогнозировать результат выполнения поставленной задачи посредством АНПА с определенными характеристиками невозможно, и для оценки вероятности выполнения задачи необходимо проведение серии испытаний с разыгрыванием случайных факторов, оказывающих влияние на поведение АНПА. Случайными факторами могут служить положения препятствий, условия окружающей среды, волнение моря, тип грунта, солёность воды и давление, вертикальный профиль скорости звука и др.

Назовем серию испытаний с образцом АНПА № 1 процессом 1, а серию испытаний с образцом АНПА № 2 — процессом 2. Для принятия решения о выборе первого или второго образца АНПА проверяется гипотеза $P_1 > P_2$ против конкурирующей гипотезы $P_1 < P_2$, где P_1 и P_2 — вероятности успешного выполнения задания в каждой из серии испытаний.

Превосходство процесса 2 над процессом 1 определяется выражением $k_2 = P_2/P_1$, а превосходство процесса 1 над процессом 2 — выражением $k_1 = P_1/P_2$. Тогда относительное превосходство процесса 2 над процессом 1 определяется выражением $u = k_2/k_1$.

С учетом, что $P_1 + P_2 = 1$, получаем выражение для оценки относительного превосходства процесса 2 над процессом 1 [1]:

$$u = \frac{\frac{P_2}{1-P_2}}{\frac{P_1}{1-P_1}} = \frac{P_2(1-P_1)}{P_1(1-P_2)}. \quad (3)$$

Если $u = 1$, процессы одинаковы, если $u > 1$, то процесс 2 лучше процесса 1, если $u < 1$, то лучше процесс 1. Для принятия решения о сравнительной оценке процессов выбираются два значения u_0 и u_1 , $u_0 < u_1$, означающие, что отказ от процесса 1 в пользу процесса 2 рассматривается как ошибка, когда истинное значение $u < u_0$, и сохранение процесса 1 рассматривается как ошибка, когда $u > u_1$. Если $u \in (u_0, u_1)$, то считается, что любое принятое решение правильное.

Для выбора значения u из выражения (3) учитывается эффективность АНПА, выраженная вероятностями P_1 и P_2 выполнения поставленной задачи первым и вторым АНПА.

В том случае, если используются несколько АНПА, то с увеличением числа АНПА повышается вероятность выполнения поставленной задачи. Обозначим вероятность выполнения поставленной задачи группой одного вида АНПА через W_{s_1} , а выполнения другого вида АНПА через W_{s_2} .

Для группы выражение (3) перепишем в виде:

$$Q = \frac{W_{s_2}(1 - W_{s_1})}{W_{s_1}(1 - W_{s_2})}.$$

Физический смысл величины Q заключается в том, что она показывает, во сколько раз изменится число средств, необходимых для выполнения поставленной задачи, если заменить первый вариант АНПА на второй. По сути, изменение числа средств — это плата за изменение частного критерия вероятности выполнения поставленной задачи P одним АНПА.

Необходимое число АНПА K для выполнения поставленной задачи представим, по аналогии с работой [15], в виде отношения правдоподобия в логарифмической форме:

$$K = \frac{\ln(1 - P)}{\ln(1 - W_s)}, \quad (4)$$

где W_s — вероятность обследования заданной территории группой АНПА, P — вероятность обследования заданной территории одиночным АНПА.

Будем полагать, что показателем эффективности решения поставленной задачи служит вероятность ее выполнения.

Значение K из формулы (4) позволяет оценить степень соответствия значения P относительно заданной эффективности W_s в величинах, обратных требуемому числу АНПА Q .

3. ПЕРЕХОД ОТ ВЕРОЯТНОСТИ К ФУНКЦИИ СООТВЕТСТВИЯ

При использовании одиночного АНПА для решения поставленной задачи эффективность выполнения задачи W_s определяется вероятностью выполнения той же задачи одиночным АНПА, т. е. $W_s = P$.

Поскольку вероятности в формуле (2) связаны с гидроакустическими расчетами и не могут быть формализованы аналитическими выражениями при формировании свертки, то в этом случае теряется возможность в явном виде выделить значимые параметры, оказывающие существенное влияние на итоговую вероятность. Поэтому в таких

случаях целесообразно воспользоваться функцией соответствия. В настоящей работе предлагается от рассмотрения вероятностей P_i перейти к рассмотрению функций соответствия $S_i(P_i)$ по вероятности выполнения i -й задачи, как это сделано, например, в работе [15].

Выбор вида функции соответствия $S(P)$ в настоящей работе, по аналогии с работой [15], опирается на следующие правила:

— функция соответствия представляет собой одноместную действительную функцию вида $S: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, которая удовлетворяет условиям:

— функция $S(P)$ имеет ясный физический смысл;

— функция $S(P)$ непрерывна и не имеет разрывов 1-го и 2-го рода;

— функция $S(P)$ является неубывающей и принимает значения на концах области определения $S(0) = 0$ и $S(1) = 1$.

Учет перечисленных правил позволил сформировать функцию соответствия $S_3(P)$ по эффективности, удовлетворяющую всем требованиям, предъявляемым к функциям соответствия:

$$S_3(P) = \begin{cases} \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-W_s)} & \text{при } P < W_s, \\ 1 & \text{при } W_s \leq P \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

Функция $S_3(P)$ в формуле (5) позволяет оценивать степень соответствия значения P относительно заданной эффективности W_s в величинах, обратных требуемому числу K АНПА для обследования заданной территории. Функция соответствия (5) непрерывна, но на интервале $P \in [W_s, 1]$ имеет участок безразличия [1].

Функцию соответствия по надежности $S_n(P_n)$, по аналогии с работой [15], представим в виде [14]

$$S_n(P_n) = e^{-\left|\frac{P_n-1}{\delta}\right|^m}, \quad (6)$$

так как предполагается, что вероятность безотказной работы описывается экспоненциальным законом

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ — интенсивность отказов.

Функция (6) обладает двумя степенями свободы: показатель степени m позволяет изменять форму функции; знаменатель δ определяет ширину диапазона изменения разности: если $\delta < 1$, то диапазон расширяется, если $\delta > 1$, то диапазон сужается. Функция вида (6) удовлетворяет всем требо-

ваниям, предъявляемым к функции соответствия по надежности. Значения коэффициентов m и δ определяются методом экспертных оценок для каждого образца АНПА.

После того, как осуществлен переход от вероятностей эффективности и надежности к функциям соответствия по эффективности и по надежности, в выражении (1) произведение двух функций соответствия будет подчинено правилам нечеткой логики [21], в частности, правилу треугольной нормы. При этом треугольная норма (t -норма), представляющая собой двуместную действительную функцию $T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, удовлетворяет условиям [21–23]: ограниченности, монотонности, коммутативности и ассоциативности.

Следуя работе [15], воспользуемся треугольной нормой в виде:

$$T(S_p(P), S_n(P_n)) = W_{\text{пр}}(S_p(P), S_n(P_n)) = (S_p(P), S_n(P_n)),$$

где $W_{\text{пр}}(S_p(P), S_n(P_n))$ — приведенный критерий свертки.

Поэтому окончательное выражение для приведенного критерия свертки с учетом функций соответствия по эффективности и по надежности примет вид:

$$W_{\text{пр}}(S_3(P), S_n(P_n)) = \begin{cases} \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-W_s(P))} e^{-\left|\frac{P_n-1}{\delta}\right|^m}, & \text{при } P < W_s, \\ e^{-\left|\frac{P_n-1}{\delta}\right|^m} & \text{при } W_s \leq P \leq 1. \end{cases} \quad (7)$$

Учитывая выражение (7), решение о выборе АНПА принимается по максимуму приведенного критерия свертки с учетом функций соответствия по эффективности и по надежности. В полученном выражении (7) в качестве параметра служит функция соответствия по эффективности W_s функционирования группы АНПА. Однако, как отмечалось во Введении, эффективность W_s функционирования группы АНПА зависит не только от эффективности одиночного аппарата, но и от способа организации аппаратов в группе. Поэтому на следующем этапе исследований оценивалось влияние способа организации аппаратов в группе на эффективность выполнения поставленной перед группой задачи.

4. СПОСОБЫ ОРГАНИЗАЦИИ АППАРАТОВ В ГРУППЕ

Наиболее распространены следующие способы организации АНПА в группе при обследовании



территории [24—27]: шеренгой; стайей; роем; организованной мультиагентной системой (МАС).

Движение АНПА *шеренгой* опирается на заранее заданную программу каждого аппарата, заключающуюся в формировании всех маршрутных точек заранее, до начала выполнения поставленной задачи. Недостаток такого способа состоит в отсутствии гибкости и прогнозирования непредвиденных, в том числе и аварийных ситуаций, а также корректировки поведения АНПА в зависимости от сложившейся ситуации.

Движение организованной группой заключается в одновременном обследовании территории более чем одним аппаратом и допускает перестроение в зависимости от сложившейся ситуации. Такой подход увеличивает скорость обследования территории, но требует время на перестроение аппаратов при изменении курса, что понижает эффективность решения поставленной задачи обследования территории.

Самоорганизующаяся система типа *стая*, функционирующая по алгоритму SWARM, применяет элементы интеллекта, заложенного в виде алгоритмов на борту АНПА. Согласно алгоритму SWARM поведение каждого АНПА должно удовлетворять трем правилам:

- правило разделения: каждый аппарат должен стремиться избежать столкновения с другими аппаратами стаи;
- правило выравнивания: каждый аппарат должен двигаться в том же направлении, что и другие аппараты стаи;
- правило сплоченности: все аппараты должны стремиться двигаться на равном расстоянии друг от друга, стремясь к средней позиции (центру масс) стаи.

Такая организация позволяет адаптивно подстраиваться под изменения обстановки. Однако отсутствие планировщика траектории не позволяет оценить оптимальность построения группы, что приводит к снижению эффективности выполнения поставленной перед группой АНПА задачи.

Достоинства стаи состоят в относительной простоте логики агентов, а также в равнозначности и взаимозаменяемости агентов.

Недостатки такой организации заключаются в отсутствии лидера стаи, что осложняет управление направлением движения стаи, и в необходимости отслеживания положения центра масс стаи, что при большом числе особей в стае затруднительно.

Способ типа *рой* характеризуется самоорганизацией без выделения лидера. Все АНПА роя действуют индивидуально в соответствии с одним управляющим принципом: ускоряться в направлении наилучшей персональной и наилучшей общей

позиции, постоянно проверяя значение текущей позиции. Применяются элементы интеллекта, заложенного в виде алгоритмов на борту АНПА, что позволяет адаптивно подстраиваться под изменения обстановки. Однако, как и в случае стаи, отсутствие планировщика траектории не позволяет оценить оптимальность построения группы, что приводит к снижению эффективности выполнения поставленной перед группой АНПА задачи.

При управлении группой типа «рой» каждый аппарат общается только с частью других аппаратов, принадлежащих роя. Главное достоинство роя — динамичность. Другое его достоинство заключается в устойчивости к выходу из строя одного или нескольких АНПА, поскольку их отсутствие никак не сказывается на функционировании остальных АНПА, так как они общаются с ближайшими и не держат в памяти список остальных АНПА. В то же время поведение «роя» является вероятностным и непредсказуемым. Благодаря этому способ «рой» целесообразно применять для решения задач патрулирования местности и обследования территории.

Применение *мультиагентной системы* предопределяет возможность каждому АНПА самостоятельно принимать решение относительно дальнейшего своего поведения, которое определяется заложенными в систему управления АНПА алгоритмами и данными, поступающими на измерительные устройства АНПА. Для самоорганизации происходит постоянный обмен информацией между аппаратами группы. Такой подход, называемый мультиагентным, приводит к существенному повышению скорости обследования и позволяет адаптироваться под изменяющиеся условия. Однако постоянный взаимный обмен информацией между аппаратами требует наличия скоростного канала связи между АНПА-агентами.

5. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОМ В ГРУППЕ

Для оценки влияния управления АНПА в группе на эффективность функционирования группы специально была разработана математическая модель группового функционирования АНПА.

Математическая имитационная модель функционирования АНПА учитывала гидродинамические, гидроакустические и гидрофизические особенности морской среды, поведения АНПА, состояния поверхности моря и рельефа грунта [28, 29].

Движение АНПА описывалось традиционными уравнениями Эйлера динамического состояния объекта в морской среде. Влияние морской среды на распространение звукового сигнала при осве-

щении обстановки выражено посредством объемной и граничной ревербераций. Тип грунта и состояние поверхности учитывались соответствующими коэффициентами отражения при различных параметрах волнения моря и типов грунта (ил, камень, песок). При распространении звука в воде учитывались его затухание с увеличением расстояния от источника излучения и искривление хода звуковых лучей в зависимости от распределения профиля скорости звука в воде.

При моделировании учитывались интеллектуальные возможности АНПА, в том числе и по функционированию в составе группы.

Разработанная математическая модель учитывает особенности поведения АНПА в морской среде.

По аналогии с работами [18, 28, 29] в качестве критерия эффективности функционирования группы АНПА была выбрана вероятность W_s того, что поставленная задача обследования заданного района будет выполнена в заданный период времени.

С помощью разработанной математической модели выполнены численные эксперименты, направленные на исследование влияния на эффективность функционирования группы:

- способа управления группой АНПА;
- численного состава группы.

Весь процесс функционирования группы АНПА при имитации разбивался на такты, в каждом из которых пересчитывались параметры АНПА и внешней обстановки.

Результаты исследований вероятности функционирования группы аппаратов

Способ организации АНПА в группе	Число АНПА в группе (K)	Время обследования, такт	Вероятность W_s выполнения группой поставленной задачи
Одиночный АНПА	1	98,00	0,98
Движение шеренгой	2	51,12	0,96
	10	35,56	0,57
Рой	2	50,38	0,98
	10	32,47	0,62
Стая	2	53,04	0,92
	10	28,23	0,71
МАС	2	51,07	0,96
	10	22,15	0,90

В ходе численного эксперимента рассматривалась задача, связанная с последовательным обследованием группой АНПА заданного района размером 10×10 миль.

Входными параметрами являлись:

- стартовые значения курса, скорости и глубины АНПА;
- тип грунта и волнение моря, влияющие на дальность освещения обстановки и дальность связи.

Варьировались параметры: число АНПА в группе ($K = 1, 2$ и 10); заданное время выполнения задания; вероятность безотказной работы, характеризующая надежность; способ организации управления группой при выполнении задания. Рассматривались четыре способа организации АНПА в группе: шеренга, рой, стая и МАС. Выходные параметры: время, затраченное группой АНПА на обследование района; вероятность выполнения поставленной задачи группой АНПА.

Результаты численных экспериментов приведены в таблице. В крайнем правом столбце приведены эффективности выполнения поставленной задачи из расчета, что если для одиночного аппарата время обследования составило 98 тактов имитации, то для двух аппаратов при обследовании того же самого района это время должно составить $98/2 = 49$ тактов имитации, для десяти аппаратов — соответственно $[9,8] = 10$ тактов имитации.

Вероятность выполнения поставленной задачи одиночным АНПА из состава группы определялась как отношение требуемого времени обследования заданного района к фактически затраченному (столбец 3 таблицы).

По результатам численного эксперимента с помощью описанной имитационной модели была получена вероятность выполнения поставленной задачи W_s . В таблице приведены значения вероятностей W_s выполнения группой задачи, заключающейся в осмотре заданного района размером 10×10 миль. Значение функции соответствия по надежности принималось равным 1. При проведении исследований был задан порог по времени осмотра района, равный 49 временным тактам имитации при обследовании района двумя АНПА и 20 временным тактам при обследовании района десятью АНПА.

Результаты, приведенные в таблице, позволили получить количественные оценки влияния способа организации АНПА в группе на вероятность W_s .

Однако для того чтобы иметь возможность проведения сравнительной оценки различных образцов АНПА для принятия решения о выборе конкретного образца АНПА, необходимо дополнительно получить оценки влияния организации группы

АНПА на эффективность P одиночного аппарата. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на оценку этого влияния. Для этого при фиксированном значении ограничения по времени осмотра заданного района в каждом испытании определялся результат выполнения поставленной задачи. Результативным считалось испытание, если время выполнения поставленной задачи оказывалось в пределах заданного. В противном случае испытание считалось нерезультативным. Вероятность W_s выполнения задания определялась как отношение числа результативных испытаний к их общему числу.

В ходе проведения исследований задавалось пороговое ограничение по времени осмотра заданного района. По полученному времени определялась вероятность W_s выполнения группой поставленной задачи. Пороговое ограничение по времени варьировалось, и определялось, за какое предельно допустимое время должен быть осмотрен заданный участок. По полученному значению времени определялась эффективность P одиночного аппарата при функционировании его в составе группы.

После подстановки полученной вероятности в формулу (5) оценивалась эффективность одиночного аппарата из состава группы:

$$P = 1 - \exp \frac{\ln(1 - W_s)}{K}.$$

Очевидно, что чем быстрее была фактически осмотрена территория, т. е. чем выше вероятность W_s выполнения группой АНПА поставленной задачи в целом, тем жестче требования к вероятности выполнения поставленной задачи каждым аппаратом: с увеличением W_s возрастает P .

Далее в каждой серии испытаний изменялось время осмотра в диапазоне от 20 до 50 тактов. Результаты исследований представлены на рис. 1 и 2. По вертикальной оси отложена вероятность W_s , по горизонтальной — значения функции соответствия по надежности. На рис. 1 и 2 приведены три кривые для $K = 2$ (рис. 1) и четыре кривых для $K = 10$ (рис. 2). Полученные результаты позволяют утверждать, что эффективность W_s выполнения поставленной задачи в целом меняется в зависимости от изменения порогового значения времени осмотра.

Из графиков видно, что способ организации группы оказывает влияние на эффективность одиночного аппарата — различие по эффективности составило 0,13 при $K = 2$ и 0,08 при $K = 10$.

По результатам моделирования выявлено, что при выполнении поставленной задачи группой из

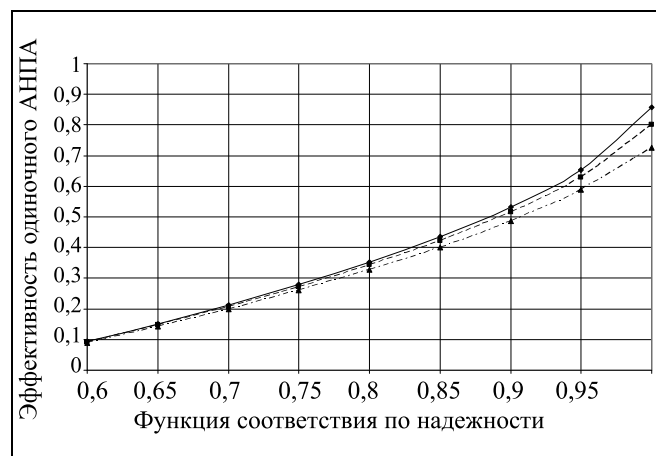


Рис. 1. Два аппарата в группе. Результаты эффективности одиночного аппарата для различных значений W_s : —♦— рой; ----■---- шеренга, МАС;▲..... стая

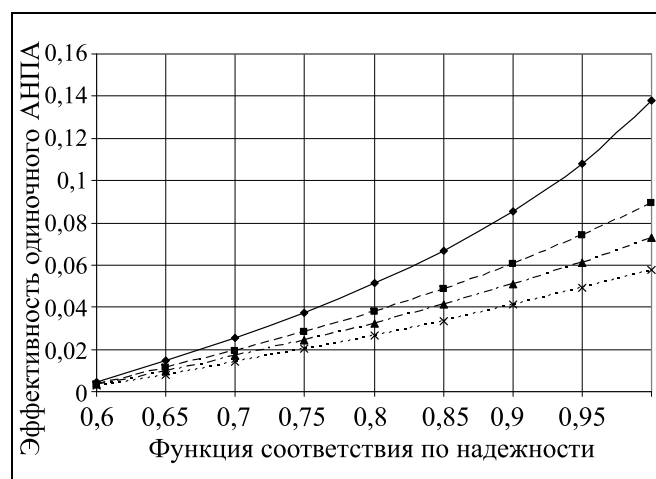


Рис. 2. Десять аппаратов в группе. Результаты эффективности одиночного аппарата для различных значений W_s : —♦— МАС; ----■---- стая;▲..... рой; -.-.-.-х- шеренга

двух аппаратов различная организация управления группой привела к существенному изменению вероятности выполнения поставленной задачи одиночным аппаратом из группы: от 0,72 до 0,85. Различие в результатах особенно критично в связи с их близостью к порогу 0,8 принятия решения относительно целесообразности применения группы для выполнения поставленной задачи. Вместе с тем при переходе от двух к десяти аппаратам различная организация управления АНПА в группе привела к незначительному различию по вероятности выполнения поставленной задачи АНПА — лишь в пределах 0,08.

6. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЯ О ВЫБОРЕ АППАРАТА

Таким образом, результаты исследований показали, что на эффективность функционирования группы АНПА влияние оказывает не только эффективность одиночного аппарата, но и организация их группового взаимодействия. Поэтому и сравнительный анализ двух образцов АНПА на основе их эффективности необходимо вести с учетом возможного группового применения АНПА, и при выборе наиболее предпочтительного варианта АНПА необходимо учитывать организацию группового управления.

Поэтому принятие решения о выборе АНПА необходимо осуществлять по максимуму эффективности $W_{пр}$, которая будет определяться вместо выражения (7) выражением, учитывающим зависимость эффективности выполнения поставленной задачи группы как от эффективности одиночного АНПА, так и от способа организации АНПА в группе:

$$W_{пр}(S_3(P), S_H(P_H)) = \begin{cases} \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-W_s(P, G))} e^{-\left|\frac{P_H-1}{\delta}\right|^m}, & \text{при } P < W_s, \\ e^{-\left|\frac{P_H-1}{\delta}\right|^m} & \text{при } W_s \leq P \leq 1, \end{cases}$$

где запись $W_s(P, G)$ означает зависимость эффективности W_s не только от эффективности P одиночного аппарата, но и от способа G организации АНПА в группе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение перечислим полученные результаты:

— рассмотрены подходы к принятию решения о выборе образца техники при одиночном и залповом применении;

— рассмотрены варианты организации аппаратов в группе;

— получена оценка влияния организации аппаратов в группе на эффективность выполнения группой поставленной задачи;

— предложен подход к принятию решения о выборе конкретного образца аппарата для работы в группе с учетом влияния как эффективности одиночного аппарата, так и организации взаимодействия аппаратов в группе.

ЛИТЕРАТУРА

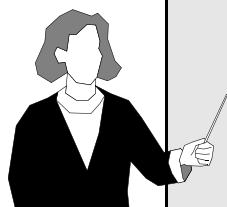
1. *Справочник по исследованию операций* / под общ. ред. Ф.А. Мативейчука. — М.: Воениздат, 1979. — 368 с.
2. *Кини Р.Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / под ред. И.Ф. Шахнова. — М.: Радио и связь, 1981. — 560 с.
3. *Захаров, И.Г.* Теория компромиссных решений при проектировании корабля. — Л.: Судостроение. — 1987. — 137 с.
4. *Al-Khatib H., Antonelli G., Caffaz A., et al.* Navigation, guidance and control of underwater vehicles within the widely scalable mobile underwater sonar technology project: an overview // 4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV). Girona, Spain, 28–30 April, 2015. IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48, iss. 2. — P. 189–193. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315002700> (дата обращения 24.12.2018).
5. *Indiveri G., Gomes J.A.* Geophysical surveying with marine networked mobile robotic systems: The WiMUST project // WUWNET '14 Proc. of the Int. Conf. on Underwater Networks & Systems, Rome, Italy, November 12–14, 2014. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1145/2671490.2677084> (дата обращения 24.12.2018).
6. *Al-Khatib H., Antonelli G., Caffaz A., et al.* The widely scalable mobile underwater sonar technology (WiMUST) project: an overview // Proc. of MTS/IEEE Oceans'15, Genova, Italy, May 18–21, 2015, P. 1–5. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271688> (дата обращения 24.12.2018).
7. *Jesus S.* Distributed sensor array for bottom inversion / IEEE/OES China Ocean Acoustics'2016, Harbin (China), 9–11 January, 2016.
8. *Abreu P.C., Pascoal A.M.* Formation control in the scope of the morph project. part i: Theoretical foundations // 4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV). Girona, Spain, 28–30 April, 2015. IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48, iss. 2. — P. 244–249. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.040>.
9. *Abreu P.C., Bayat M., Pascoal A.M., et al.* Formation control in the scope of the morph project. part ii: Implementation and results // Ibid. — P. 250–255. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.041> (дата обращения 24.12.2018).
10. *Abreu P.C., Bayat M., Botelho J., Gois P., Gomes J., Pascoal A., Ribeiro J., Ribeiro M., Rufino M., Sebastiao L., Silva H.* Cooperative formation control in the scope of the ec morph project: Theory and experiments // Proc. of MTS/IEEE Oceans'15. Genova, May 2015. — P. 1–7. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271697> (дата обращения 24.12.2018).
11. *De Palma D., Indiveri G., Pascoal A.M.* A null-space-based behavioral approach to single range underwater positioning // 10th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC 2015, Copenhagen, 24–26 August, 2015. — Vol. 48, iss. 16. — P. 55–60. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.258> (дата обращения 24.12.2018).
12. *Furfaro T., Alves J.* An application of distributed long baseline — node ranging in an underwater network // Underwater Communications and Networking (UComms), 2014, Sestri Levante, Italy, Sept 2014. — P. 1–5. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/UComms.2014.7017126> (дата обращения 24.12.2018).
13. *Vermeij A., Munafo A.* A robust, opportunistic clock synchronization algorithm for ad hoc underwater acoustic networks // IEEE Journal of Oceanic Engineering. — Oct. 2015. — Vol. 40,



- N 4. — P. 841—852. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JOE.2015.2469955> (дата обращения 24.12.2018).
14. *Проектирование зенитных управляемых ракет* / И.И. Архангельский, П.П. Афанасьев, Е.Г. Болотов и др. / под ред. И.С. Голубева, В.Г. Светлова. — М.: Изд-во МАИ, 2001. — 732 с.
 15. *Витин В.Ф., Калягин М.Ю., Сафронов В.С.* Возможный подход к формированию обобщенного мультипликативного критерия оценки эффективности летательного аппарата // *Авиационное приборостроение*. — 2017. — № 9. — С. 20—27.
 16. *Городецкий В.И., Карсаев О.В.* Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. — 2017. — № 2 (187). — С. 234—247.
 17. *Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В.* Прикладные многоагентные системы группового управления // *Искусственный интеллект и принятие решений*. — 2009. — № 2. — С. 3—24.
 18. *Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.* К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // *Информационно-управляющие системы*. — 2016. — № 5 (84). — С. 25—34.
 19. *ГОСТ 27.002—2015.* Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2016. — 23 с.
 20. *Барбашов Г.В., Романов И.В.* Надежность и эффективность систем управления: учеб. пособие. Кн. 1. — СПб.: Балт. гос. ун-т, 2014. — 113 с.
 21. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 166 с.
 22. *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта* / под ред. Д.А. Поспелова. — М., 1986. — 312 с.
 23. *Batyrshin I., Kacprzyk J., Sheremetov L., Zadeh L.A.* (Eds.) Perception-based Data Mining and Decision Making in Economics and Finance. Series: Studies in Computational Intelligence. 2007. — Vol. 36. — 367 p.
 24. *Kozhemyakin I., Rozhdestvensky K., Ryzhov V., et al.* Educational Marine Robotics in SMTU // *ICR 2016*. — P. 79—88.
 25. *Zanin V., Kozhemyakin I., Potekhin Y., et al.* Open-Source Modular μ AUV for Cooperative Missions // *ICR 2017*. — P. 275—285.
 26. *Белов Б.П., Казнаков Б.А., Родионов А.А., Семенов Н.Н.* Сеть информационных мобильных подводных роботов для освещения подводной обстановки // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2012. — № 1. — С. 129—137.
 27. *Кожемакин И.В., Рыжов В.А., Семенов Н.Н., Чемоданов М.Н.* Мультиагентная система управления группой АНПА с несколькими лидерами // *Int. Conf. on Marine Robotics in Ocean Exploration, Marine Robotics—2017, October 9—11, Saint-Petersburg, Russia*. — С. 1—10.
 28. *Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.* Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // *Материалы конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС—2016) 4—6 октября 2016 г., СПб., АО «Концерн «Электроприбор»*, 2016. — С. 205—209.
 29. *Мартынова Л.А.* Имитационная модель оценки эффективности функционирования АНПА // *Int. Conf. on Naval Architecture and Ocean Engineering, 6—8 June, 2016, Saint-Petersburg, Russia. Collection of Papers. Тр. Междунар. конф. по судостроению и океанотехнике*. — СПб., 2016. — С. 455—469.
- Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.В. Мещеряковым.*
- Мартынова Любовь Александровна** — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург; науч. сотрудник, Главный научно-исследовательский испытательный центр Министерства обороны РФ, г. Москва, ✉ martynowa999@bk.ru,
- Розенгауз Михаил Борисович** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, ✉ rozengauz_mb@mail.ru.
- Поступила в редакцию 23.10.2018, после доработки 14.11.2018.
Принята к публикации 21.11.2018.*

Читайте в ближайших номерах

- ✓ **Бабушкина Н.А., Кузина Е.А., Лоос А.А., Беляева Е.В.** Математическое моделирование управления противоопухолевой вакцинотерапией
- ✓ **Васильюк Н.Н.** Слабое комплексирование инерциальных и спутниковых измерений при помощи расширенного фильтра Калмана с кватернионным представлением ориентации
- ✓ **Ефремов А.Ю., Легович Ю.С.** Стайное управление малыми беспилотными летательными аппаратами в двумерной среде с препятствиями
- ✓ **Куприянов Б.В.** Оценка производительности и оптимизация рекурсивного конвейерного процесса промышленных предприятий
- ✓ **Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Коньков А.Е., Патров М.И.** Управление плазмой в токамаках. Ч. 3. Системы магнитного управления плазмой в ITER и DEMO
- ✓ **Стельмах В.С.** Разработка и апробация логистической модели оценки банкротства
- ✓ **Топка В.В.** Расширенная модель инновационного проекта при бинарном взаимном воздействии его работ
- ✓ **Чесноков М.Ю.** Поиск аномалий в задаче повышения качества открытых данных
- ✓ **XXVI международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем»**





ОДИННАДЦАТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЕМ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СИСТЕМ» MLSD'2018

Начиная с 2007 г., в Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН) ежегодно проводится международная конференция по управлению развитием крупномасштабных систем (Management of Large-scale System Development — MLSD). Основная цель конференции заключается в представлении новых фундаментальных и научно-практических результатов исследований по различным направлениям и областям управления развитием крупномасштабных систем. Конференция стала междисциплинарным форумом исследователей академических институтов, преподавателей и специалистов-практиков российских и зарубежных научных и образовательных учреждений. Традиционная тематика конференции охватывает широкий спектр проблем управления развитием топливно-энергетических, транспортных, инфраструктурных, организационно-технических комплексов, крупномасштабных производств и технологий, объектов атомной энергетики, систем здравоохранения, медико-биологических систем.

В период с 1 по 3 октября 2018 г. состоялась Одиннадцатая международная конференция «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018), особый акцент которой сделан на исследованиях, связанных с созданием условий для развития цифровой экономики Российской Федерации. Как отмечено в Программе до 2035 г. «Развитие цифровой экономики в России», разработка новых подходов к аналитике, прогнозированию и принятию управленческих решений становится задачей стратегической важности в контексте социально-экономического благополучия государства и как условие сохранения суверенитета на фоне глобализации и реализации программ развития другими участниками мирового рынка.

Научные направления конференции MLSD'2018 расширились благодаря открытию новых секций, ориентированных на изучение вопросов анализа «больших данных», социальных сетей, управления

развитием цифровой экономики, прогнозирования, внедрения новых способов управления в прикладные области управления и др. В результате на одиннадцатой конференции MLSD'2018 работали следующие 16 секций.

1. Проблемы управления развитием крупномасштабных систем, включая ТНК, госхолдинги и госкорпорации.

2. Методы и инструментальные средства управления инвестиционными проектами и программами.

3. Управление развитием цифровой экономики. Проектные офисы и ситуационные и прогнозно-аналитические центры, институты развития крупномасштабных систем.

4. Имитация и оптимизация в задачах управления развитием крупномасштабных систем.

5. Нелинейные процессы и вычислительные методы в задачах управления крупномасштабными системами.

6. Управление развитием банковских и финансовых систем.

7. Управление топливно-энергетическими, инфраструктурными и другими системами.

8. Управление транспортными системами.

9. Управление развитием авиационно-космических и других крупномасштабных организационно-технических комплексов.

10. Управление развитием региональных, городских и муниципальных систем.

11. Управление объектами атомной энергетики и другими объектами повышенной опасности.

12. Информационное и программное обеспечение систем управления крупномасштабными производствами.

13. Методология, методы и программно-алгоритмическое обеспечение обработки и интеллектуального анализа больших массивов информации.

14. Мониторинг в управлении развитием крупномасштабных систем.



15. Управление развитием крупномасштабных систем здравоохранения, медико-биологических систем и технологий.

16. Управление развитием социальных систем.

В работе конференции MLSD'2018 приняли участие более 670 ученых из России и других стран, в том числе, сотрудники 30 институтов семи отделений РАН, 50 вузов из 40 городов.

В программу MLSD'2018 включены 28 пленарных и 370 секционных докладов, представленных учреждениями Российской академии наук, вузами, академиями и университетами, а также управленческими и коммерческими организациями и рядом зарубежных научных учреждений. Фактически программа конференции MLSD'2018 — единая система профильных направлений развития отраслевого и межотраслевого уровня.

Рабочие языки конференции — русский и английский. Предварительно изданы тезисы всех докладов. Два месяца после окончания конференции — период оформления трудов конференции и статей на английском языке, подготовленных к включению в цифровую библиотеку IEEE Xplore.

Организации конференции MLSD'2018 оказал финансовую поддержку РФФИ (научный проект № 18-07-20063).

Открывая пленарное заседание и приветствуя участников конференции, заместитель председателя Программного комитета конференции д-р техн. наук *А.Д. Цвиркун* отметил, что организация и проведение международной конференции по управлению развитием крупномасштабных систем нацелены на обсуждение современных проблем управления в области обеспечения технологического лидерства в условиях формирования глобального цифрового пространства. *А.Д. Цвиркун* призвал выступающих соотносить рассматриваемые в докладах результаты научных исследований с основными задачами сквозного проникновения цифровых технологий во все отрасли экономики и в социальную сферу.

Большой интерес представляют пленарные доклады, посвященные проблемам формирования моделей экономики, реализуемых в крупномасштабных проектах управления развитием иерархических и сетевых систем. К ним относятся доклады:

- чл.-корр. РАН *Д.А. Новикова* (ИПУ РАН, г. Москва) «Проблемы управления развитием иерархических и сетевых систем»;
- акад. РАН *С.Н. Васильева*, д-ра техн. наук *А.Д. Цвиркуна* (ИПУ РАН, г. Москва) «Актуальные проблемы управления развитием крупномасштабных систем»;
- акад. РАН *В.В. Ивантера*, д-ра экон. наук *Н.И. Комкова* (Институт народнохозяйственно-

го прогнозирования, г. Москва) «Проблемы и возможности формирования прогрессивной модели экономики»;

- д-ра техн. наук *В.В. Баранова* (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва) «Условия устойчивости управляемого развития в системах с иерархической структурой интересов»;
- канд. техн. наук *З.К. Авдеевой* (ИПУ РАН, г. Москва), д-ров техн. наук *А.А. Зацаринного*, *К.К. Колина* (Институт проблем информатики ФИЦ «Информатика и управление» РАН, г. Москва), *Н.И. Ильина* (Управление информационных систем спецсвязи ФСО России, г. Москва), д-ра психол. наук *В.Е. Лепского* (Институт философии РАН, г. Москва), д-ра физ.-мат. наук *Г.Г. Малинецкого* (Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва), д-ра техн. наук *А.Н. Райкова* (ИПУ РАН, г. Москва), канд. физ.-мат. наук *Б.Б. Славина* (Финансовый университет при Правительстве РФ, г. Москва) «Прорывное ситуационное управление»;
- д-ра техн. наук *Н.А. Коргина* (ИПУ РАН, г. Москва) «Наглядные технологии для решения задач согласования интересов в крупномасштабных системах»;
- д-ра техн. наук *В.А. Ирикова* (МФТИ, г. Москва) «Об ускорении развития России за счет улучшения управления инновациями».

Комплексный теоретический подход к созданию цифрового актива рассмотрен в пленарном докладе д-ров техн. наук *В.К. Акинфиева*, *А.Д. Цвиркуна* (ИПУ РАН) «Подход к моделированию развития крупномасштабных систем на примере рынка нефти». Задача анализа рынка нефти в условиях неопределенности спроса сведена к математическому анализу динамической матричной игры, в которой матрица выигрышей формируется в результате численного моделирования.

Как известно, для концептуального осмысления проблем управления крупномасштабным развитием прибегают к термину «цифровая платформа роста». Данное понятие трактуется по-разному, однако его ключевая роль заключается в разработке перспективных структур «цифровой кооперации», в рамках которой выстраивается диалог между государством и бизнесом. Обсуждение этой проблемы на пленарном заседании прошло в рамках следующих докладов.

В докладе д-ров техн. наук *В.Н. Буркова*, *И.В. Бурковой* (ИПУ РАН, г. Москва) «Цифровая экономика и умная экономика: проблемы и перспективы» исследуются стратегические проблемы

«умных механизмов управления» и направления их внедрения.

В докладе д-ра техн. наук *Ф.И. Ерешко* (Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН ФИЦ «Информатика и управление» РАН, г. Москва), д-ра техн. наук *В.И. Меденникова* (МНИИАПУ, г. Москва) «Формирование цифровых платформ на базе технологии распределенных реестров» сделан упор на платформу интеграции различных отраслевых цифровых платформ в единую цифровую платформу страны.

В докладе д-ра экон. наук *В.Г. Варнавского* (Институт мировой экономики и международных отношений РАН им. Е.М. Примакова, г. Москва) «Управление глобальными цепочками создания стоимости» предложены механизмы оценки межстранового межотраслевого баланса как основного инструмента исследования проблем развития мировой экономики и эластичности мировой торговли.

В докладе чл.-корр. РАН *В.И. Суслова*, д-ра экон. наук *В.Г. Басаревой* (Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН, г. Новосибирск) «Экономическое пространство в эпоху цифровой экономики: возможные тренды» проанализированы перспективные варианты трансформации экономического пространства при переходе к цифровому управлению развитием экономики, а также предложены стратегии пространственного развития России.

Доклад д-ра техн. наук *Ф.Т. Алескерова* (ИПУ РАН, г. Москва) «Неоднородность системы высшего образования и эффективность университетов» направлен на выявление механизмов управления развитием образования как единым целым.

В ряде пленарных докладов отражены вопросы влияния цифровизации управления на традиционные секторы экономики, включая энергетику, транспорт, авиационно-космическую, атомную энергетику, крупномасштабное производство, медицинские услуги и сферу социального обслуживания.

Так, вопросам цифровой трансформации энергетики посвящены доклады:

- чл.-корр. РАН *Н.И. Воропая* (Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск) «Будущие электроэнергетические системы и проблемы управления их режимами»;
- д-ра техн. наук *Л.Р. Соркина*, кандидатов техн. наук *Ю.Р. Шишорина*, *Ю.М. Цодикова* («Хонвел», США) «Повышение энергоэффективности при разработке программ долгосрочного развития и повышения операционной эффективности предприятий нефтепереработки и нефтехимии»;

- канд. техн. наук *А.В. Ахметзянова*, д-ра физ.-мат. наук *А.Г. Кушнера* (ИПУ РАН, г. Москва) «Модели оптимального управления развитием нефтяных месторождений»;
- канд. экон. наук *Ю.А. Плакиткина*, канд. техн. наук *Л.С. Плакиткиной* (Институт энергетических исследований РАН, г. Москва) «Воздействие процессов цифровизации на технологическое развитие крупномасштабных систем ТЭК (на примере угольной отрасли)».

Вопросы цифровой трансформации транспорта рассмотрены в пленарном докладе д-ра техн. наук *В.В. Цыганова* (ИПУ РАН, г. Москва) «Механизмы управления крупномасштабными транспортно-экономическими системами». Они получили дальнейшее развитие в докладах, заслушанных на секции 8 и связанных с теорией, методологией, разработкой и экспертизой больших транспортных систем.

Пленарный доклад д-ра техн. наук *В.П. Кутахова* (ФБГУ Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского»), канд. техн. наук *С.И. Пляскоты* (АНО «Институт системного анализа проблем финансовой безопасности») «Информационное взаимодействие в крупномасштабных робототехнических авиационных системах» раскрыл содержание одного из важнейших направлений внедрения цифровых технологий. Это беспилотные, мобильные, биометрические, нейрокомпьютерные и другие цифровые технологии взаимодействия человека и технических средств с окружающей средой. Более детально рассмотрению проблем цифровизации авиационно-космических и других крупномасштабных организационно-технических комплексов посвящена секция 9.

Анализу положительных эффектов управления с использованием цифровых информационно-аналитических технологий посвящены доклады секции 10 (управление развитием региональных, городских, муниципальных систем). Проекты регионального развития служат наглядной демонстрацией компетенций цифрового управления крупномасштабными системами.

Среди технологий развития цифровой экономики ключевую позицию занимают суперкомпьютерные электронные модели крупномасштабных систем, функционирующих в долгосрочной перспективе (около 100 лет и более) и требующих развития технологий поддержки принятия по сетевому сопровождению, техническому обслуживанию, модернизации. Данная проблема применительно к атомной отрасли раскрыта в пленарном докладе д-ра техн. наук *А.Г. Полетыкина* (ИПУ РАН, г. Москва) «Элемент цифровой индустрии 4.0:



виртуальная суперкомпьютерная модель для сопровождения и модернизации сложных систем управления». В ходе дальнейшего обсуждения этой темы на секции 11 (управление развитием объектов атомной энергетики и другими объектами повышенной опасности) докладчики, опираясь на опыт сопровождения АЭС «Бушер» в Иране и АЭС «Куданкулам» в Индии, ставят и намечают пути организации опосредованного практического и теоретического исследования техногенно опасных объектов на основе цифровизации анализируемых процессов.

Технологическим трендам в цифровой трансформации крупномасштабного производства посвящены два пленарных доклада:

- д-ра экон. наук *В.Н. Лившица*, кандидатов экон. наук *Т.И. Тищенко*, *М.П. Фролова* (Институт системного анализа РАН, г. Москва) «Особенности крупномасштабных мероприятий в области производственной инфраструктуры и оценки их эффективности»;
- д-ра техн. наук *О.С. Сухарева* (Институт экономики РАН, г. Москва) «Структурный анализ экономического роста России: две задачи индустриализации».

Подробным исследованиям цифрового производства посвящены 26 докладов секции 12, в которых представлены схемы сквозной автоматизации и интеграции производственных и управленческих процессов в единую информационную систему; принципы перехода на оцифрованную техническую документацию; применение инженерного программного обеспечения на разных этапах жизненного цикла от идеи до эксплуатации изделий и др.

В эпоху масштабного цифрового управления все большую актуальность принимает проблема информационной безопасности, а также методологической и инструментальной поддержки цифровых информационно-аналитических услуг. Этой проблеме посвящен доклад акад. РАН *Е.А. Микрина* (ПАО РСК «Энергия», г. Королев), д-ра техн. наук *В.В. Кульбы*, канд. техн. наук *С.К. Сомова* (ИПУ РАН, г. Москва) «Особенности обеспечения сохранности данных в распределенных системах», а также доклады секции 13 и 14.

Цифровая обработка и интеллектуальный анализ больших объемов информации (секция 13) представляет собой новый сегмент рынка средств анализа больших объемов слабоструктурированной информации, заменяющих классические статистические, аналитические или детерминированные методы.

Неотключаемый мониторинг, реализуемый современными модификациями технологий интернета

вещей (IoT, IIoT, IIoT и др.), служит инструментом ситуационной осведомленности о динамике контролируемых процессов в режиме виртуальной и добавленной реальности (секция 14). В его задачи входит слияние потоков больших данных в инфраструктуру знаний для информатизации управления развитием крупномасштабных систем.

Вопросам совершенствования медицинского обслуживания посвящен пленарный доклад кандидатов мед. наук *Н.Л. Бондаренко*, *А.В. Потемкина*, кандидатов экон. наук *И.А. Богданова*, *Т.И. Глазковой*, *М.С. Костина*, канд. техн. наук *В.М. Розина*, *М.Ю. Стерхова*, *М.В. Царевой* (ООО «ИнтеллСофт Бизнес Групп», г. Москва) «Цифровая медицина для главного врача». Этот доклад, а также доклады секции 15 достаточно подробно осветили некоторые направления складывающегося отечественного и мирового рынка услуг «HealthNet» по созданию, производству биотехнологических и медицинских продуктов.

Важным рычагом экономического развития выступают цифровые инновации в области повышения качества социальных услуг. Они связаны с обеспечением глобальной безопасности, расширением коммуникаций между государством, бизнесом и гражданским обществом, созданием новых возможностей для предпринимательства и трудовой деятельности, получением образования и расширением профессиональных квалификаций, контролем социально-незащищенных групп и др. Этой тематике посвящена работа новой секции 16, а также пленарные доклады:

- чл.-корр. РАН *А.Ф. Резчикова* (Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов) «Проблемы критических ситуаций в человеко-машинных системах»;
- д-ра техн. наук *В.В. Токарева* (ФИЦ ИУ РАН, г. Москва) «Прогнозирование и планирование в ходе международных переговоров».

Вновь созданная секция «Управление развитием социальных систем», заседания которой проходили под руководством д-ра техн. наук *В.Н. Буркова* и д-ра физ.-мат. наук *А.Г. Чхартисвили*, позволила наиболее полно раскрыть механизмы и потенциал цифровых технологий анализа, моделирования, прогнозирования и целеполагания в области управления социальными процессами. Большой интерес вызвали такие направления исследований, как сопровождение работы команд специалистов (формирование программ сотрудничества, управление репутацией, конкурсные механизмы и др.) и глобальные тренды в социальных сетях (управляемый консенсус, информационные волны, взаимное влияние агентов, моделирование дискурсивного политического пространства и др.).

На заключительном заседании представлены, обсуждены и приняты следующие решения конференции MLSD'2018.

1. Отметить стратегическую роль форума в консолидации фундаментальных и научно-практических разработок в области управления развитием крупномасштабных систем.

2. Одобрить сложившуюся практику приглашения ведущих ученых академического уровня для выступления с пленарными докладами, а также подготовки докладов на английском языке для их размещения в цифровой библиотеке IEEE Xplore. Она способствует более глубокому обсуждению проектов цифровых инноваций в управлении развитием крупномасштабных систем.

3. Рекомендовать организаторам очередной двенадцатой конференции подготовить проект создания научно-методического консультативного совета при ИПУ РАН, выполняющего функции Центра компетенций по цифровому управлению развитием крупномасштабных систем.

4. Просить руководство ИПУ РАН и программный комитет конференции MLSD рассмотреть

возможность создания электронного периодического научного журнала по тематике управления развитием крупномасштабных систем. Издание подобного журнала возможно под патронажем Центра компетенций.

5. Считать целесообразным проведение отдельных семинаров и школ для специалистов и молодых ученых по актуальным вопросам современного управления развитием крупномасштабных систем.

*Председатель Оргкомитета А.Д. Цвиркун,
секретарь Оргкомитета И.А. Степановская*

Цвиркун Анатолий Данилович — д-р техн. наук,
зав. лабораторией, ✉ tsvirkun@ipu.ru,

Степановская Ираида Александровна — канд. техн. наук,
вед. науч. сотрудник, ✉ irstepan@ipu.ru,

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

Поступила в редакцию 22.01.2019.

Принята к публикации 4.02.2019.



Содержание сборника «Управление большими системами» 2019, вып. 77

- ✓ **Белов М.В.** Статистические модели процессов приема и увольнения сотрудников
- ✓ **Белов М.В., Новиков Д.А.** Модели разработки и освоения технологии комплексной деятельности
- ✓ **Горелов М.А.** Иерархическая игра с ограничениями на содержание и объем передаваемой информации
- ✓ **Гужа Е.Д., Романенко В.А., Скороход М.А.** Нечеткая оценка эффективности трансферной системы авиаперевозок
- ✓ **Квинто Я.И., Хлебников М.В.** Верхние границы максимального отклонения траектории в линейных дискретных системах: робастная постановка
- ✓ **Подвальный С.Л., Васильев Е.М.** Многоальтернативность: эволюционная стратегия биологических систем
- ✓ **Соболев В.Н.** О законе стационарной очереди для одной системы массового обслуживания с групповым поступлением требований
- ✓ **Фуртат И.Б., Гущин П.А.** Алгоритм управления в условии насыщения сигнала управления и его производных

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

ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ФЕДОСОВ (к 90-летию со дня рождения)



14 мая 2019 г. исполняется 90 лет академику РАН Евгению Александровичу Федосову — крупному ученому в области процессов управления авиационной техникой, главным образом, систем управления боевыми режимами военных самолетов и авиационного вооружения, а также авионики гражданских самолетов.

Академик Е.А. Федосов внес значительный вклад в разработку и создание трех поколений военной авиации страны, работая в течение более полувека в Государственном научно-исследовательском институте авиационных систем (ФГУП «ГосНИИАС»), где прошел путь от инженера до Генерального директора, которым был с 1970 по 2006 г. В настоящее время является Научным руководителем ФГУП «ГосНИИАС». При его участии и руководстве в Институте были проведены необходимые исследования и отработаны системы управления вооружением всех боевых самолетов и их систем вооружения, создававшихся в СССР и Российской Федерации в эти годы.

В период руководства Е.А. Федосова Институт превратился в крупнейший научный центр системных исследований. Были созданы уникальная экспериментальная база, комплексы полунатурного моделирования, стенды комплексных воздействий, цифровые операционные модели и многое другое. В конце 1980-х гг. Институт вместе с филиалами стал крупнейшим научным коллективом страны, численностью более 9000 чел. В Инсти-

туте работало более 10 % докторов и кандидатов технических наук всей авиационной промышленности СССР.

В трудные 1990-е гг. Е.А. Федосов сумел сохранить Институт, несмотря на практическое прекращение финансирования оборонных заказов. Была проведена диверсификация деятельности Института и развернуты конверсионные работы в области авионики гражданских самолетов, управления воздушным движением, информационных технологий.

За время руководства ГосНИИАС Е.А. Федосовым Институт был отмечен наградами Правительства страны, постановлением Президиума Верховного Совета СССР в 1977 г. Институт награжден орденом Трудового Красного Знамени. Постановлением Правительства РФ в 1994 г. Институту присвоен статус Государственного научного центра. Он получил международное признание — торгово-промышленная палата Франции в 2001 г. наградила ГосНИИАС Большой золотой медалью. В 2003 г. ГНЦ ФГУП «ГосНИИАС» стал лауреатом премии «Российский Национальный Олимп».

Е.А. Федосов широко известен в научных кругах страны и за рубежом как крупный ученый в области теории систем со случайными параметрами, теории нестационарных систем управления летательных аппаратов, теории самонаведения и навигации. Он является основателем и лидером известной в мире научной школы, занимающей ведущую

роль в области навигации и наведения летательных аппаратов, создания новых наукоемких технологий, обеспечивающих высокий уровень российской авиации.

Е.А. Федосов — автор и соавтор более 300 научных работ, в том числе 19-ти монографий, по теории и системам управления вооружением, навигации и управлению воздушным движением.

В 1956 г. им была защищена диссертация кандидата технических наук, в 1967 г. — доктора технических наук. В 1979 г. Е.А. Федосов был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР, а в 1984 г. — ее действительным членом. В настоящее время является академиком Российской академии наук и академиком Российской академии ракетных и артиллерийских наук.

Он является главным редактором журнала «Известия РАН. Теория и система управления», членом редсовета журнала «Проблемы управления», председателем Объединенного научного Совета РАН по комплексной проблеме «Процессы управления и автоматизации».

Много сил Е.А. Федосов отдает общественной работе в государственных структурах страны. В 1970—1980-е гг. он неоднократно избирался депутатом Моссовета. С начала 1970-х гг. входил в состав комиссии по Ленинским и Государственным премиям СССР, а затем в состав комиссии по Государственным премиям РФ и премиям Правительства РФ в области науки и техники. Будучи членом Научно-технического Совета при Президенте РФ, выступил с инициативой создания Президентской программы «Национальная технологическая база», которая вошла в состав крупнейших федеральных целевых программ РФ. После утверждения программы в Правительстве РФ Е.А. Федосов был назначен Председателем Экспертного совета программы, состоящего из крупнейших ученых страны. Был членом Совета по науке, образованию и технологии при Президенте РФ.

В настоящее время Е.А. Федосов — заместитель академика-секретаря Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН и председатель Секции проблем машиностроения и процессов управления, председатель Объединенного научного Совета по комплексной проблеме «Процессы управления и автоматизации» РАН. Он возглавляет научную школу России «Системы обработки информации и управления современными и перспективными летательными аппаратами».

Большое внимание Евгений Александрович уделяет подготовке высококвалифицированных кадров для отрасли. Он более 25 лет преподавал в МГТУ им. Н.Э. Баумана, а с 1970 г. — заведующий кафедрой МФТИ, заслуженный профессор МФТИ. Он также возглавляет кафедру МИРЭА.

Среди его учеников два академика, член-корреспондент РАН, девять докторов и более двадцати кандидатов наук.

Страна и научная общественность высоко оценили труды Е.А. Федосова. Он неоднократно награждался орденами и медалями СССР и Российской Федерации — орденом «Знак Почета» (1966 г.), орденом Ленина (1977 г.), медалью «Золотая Звезда» Героя Социалистического Труда и орденом Ленина (1983 г.), орденом «За заслуги перед Отечеством III степени» (2004 г.), орденом Почета (2011 г.), знаком «Почетный авиастроитель». Удостоен званий лауреата Ленинской премии (1976 г.) и лауреата Премии Правительства РФ (2001 г.), «Заслуженный деятель науки Российской Федерации». Президиум АН СССР наградил его Золотой медалью им. акад. Б.Н. Петрова (1989 г.).

В настоящее время под непосредственным руководством Е.А. Федосова выполняется большой объем работ по системам управления вооружением при модернизации стратегических ракетноносцев-бомбардировщиков Ту-160, Ту-95МС, Ту-22М3 и их вооружения и по созданию перспективного авиационного комплекса дальней стратегической авиации (самолет ПАК ДА) в рамках Государственной программы вооружения РФ. Он является основоположником создания стратегических ядерных ракет воздушного базирования, а также крылатой ракеты Х-101 с обычным снаряжением. Благодаря этому в России была создана стратегическая ядерная триада.

В 2011—2018 гг. Е.А. Федосов сформировал направление «Интегральная модульная авионика» и ныне руководит им. Главное предназначение этого направления — ликвидировать отставание России от мирового уровня развития авионики (бортового радиоэлектронного оборудования).

В эти же годы Е.А. Федосов непосредственно возглавляет работы в ГосНИИАС по среднемагистральным самолетам МС-21-300 и МС-21-200. Созданы два стенда: «Электронная птица МС-21» и «Железная птица МС-21», предназначенные для сертификационных испытаний самолетов. В настоящее время стенды сопровождают летные испытания самолета МС-21 и моделируют аварийные режимы полета, которые невозможно проверить в летном эксперименте.

Евгений Александрович продолжает посвящать все свое время Институту — ГосНИИАС, целиком и полностью отдавая себя главному делу своей жизни — авиации.

Сотрудники Института проблем управления, редколлегия и редакция журнала сердечно поздравляют Евгения Александровича с юбилеем, желают ему крепкого здоровья, новых свершений на благо нашей Родины и успехов в его неугасимой деятельности!



АЛГОРИТМЫ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

В Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН разработаны уникальные алгоритмы определения взаимного пространственного расположения и угловой ориентации подвижных объектов на основе измерений параметров низкочастотного магнитного поля.

Алгоритмы позволяют:

зная свойства источника поля, располагаемого на одном объекте — дипольные моменты $\{M_1, M_2, M_3\}$ трех излучателей, работающих на разных частотах, измеряя вектор напряженности магнитного поля индукционным магнитометром, располагаемым на другом объекте, и выделяя поле каждого из излучателей в отдельности (векторы напряженности $\{H_1, H_2, H_3\}$),

определить:

- взаимное пространственное расположение объектов — параметры радиус-вектора R в системе координат источника (x, y, z) ;
- взаимное угловое расположение объектов — коэффициенты матрицы ориентации системы координат измерителя (x', y', z') относительно системы координат излучателя (x, y, z) .

Алгоритмы могут быть применены для решения задач:

- управления движением при взаимодействии подвижных объектов;
- навигации в замкнутом пространстве;
- контроля взаимного расположения буксируемых объектов.

Алгоритмы применяются на практике для определения взаимного расположения двух компонент аэроэлектро-разведочной геофизической системы «ЭКВАТОР» («ГеоТехнологии», Россия)

Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН
Профсоюзная ул., д. 65, Москва, 117997
✉ avolkovitsky@yandex.ru, karshak@mail.ru,
☎ (495) 334-90-80



Материал подготовлен канд. техн. наук А.К. Волковицким,
канд. физ.-мат. наук Е.В. Каршаковым

CONTENTS & ABSTRACTS

DESIGN OF GIVEN OSCILLATION INDEX SCALAR CONTROLLERS: MODAL AND H_∞ -APPROACHES 2

Chestnov V.N., Shatov D.V.

The algorithms of output controllers design are proposed for linear scalar plants, that ensure the desired or attainable values of oscillation index and of degree of stability, determining the settling time. Both modal control and H_∞ -approach are used in the design procedures. Examples are constructed, demonstrating that striving to provide the degree of stability that is much greater than the distance from the nearest left zero of the plant transfer function to the imaginary axis (even for the minimum phase plants) leads to the quite small gain and phase stability margins, that is unacceptable in practice.

Keywords: linear systems, controllers design, oscillation index, degree of stability, settling time.

FORMING THE SYSTEM OF DECISIONS EXECUTION CONTROL IN STATE PROJECT MANAGEMENT 9

Raikov A.N., Bauer V.P., Eremin V.V.

The problems of the project management are considered within the framework of the strategy of transferring Russian Federation State Programmes to project principles, the advanced methods of solving these problems are proposed. The algorithm is developed of forming the system of projects realization intensive control. The possibility of forming the system of preliminary control is shown, allowing to determine the projects priority, the amount of necessary for their implementation resources, and the actual estimates of their execution time. The formation of the system to supervise the preparations for the project implementation is substantiated, allowing to discard the unconscious contractors and select the effective project executors. The algorithms of monitoring the indicators of the project implementation are constructed as well as of the project developers' performance parameters control.

Keywords: project management, planning, national project, public administration, efficiency.

METHODOLOGY AND APPLIED PROBLEMS OF THE SUSTAINABLE MANAGEMENT IN ACTIVE SYSTEMS. 19

Ougolnitsky G.A.

A concept of the sustainable management in arbitrary complex dynamical systems with human participation (active systems) is presented. It is noted that the sustainable development means satisfying the requirements of homeostasis and system consistency. The mathematical formalization of the problems of the sustainable management in active systems is based on the technique of differential games in a normal form, in a form of characteristic functions, and with hierarchical structure. The formulations of the sustainable management in active systems with independent agents, cooperative agents, and hierarchical control are given. The particular classes of incentive models and models of coordination of the social and private interests are considered. The review of several other applied problems solved in the frame of the proposed concept is given. An illustrative example is provided. The emphasis is placed on the methodical aspects of the developed concept.

Keywords: active systems, cooperation, differential games, hierarchical control, sustainable development.

ANALYSIS OF RESPONSE TO TECHNOLOGICAL SHOCKS IN THE MULTI-SECTOR MODEL OF IMPERFECT COMPETITION 30

Leonidov A.V., Serebryannikova E.E.

The study presents the analysis of the effect of technological shocks on the economic system within the framework of previously described dynamic multi-sector model of imperfect competition. It is shown that the distinguishing feature of the model is in asymmetry of the response to negative and positive shocks. Namely, economic recession following negative shock is greater in absolute terms than growth appearing after positive shock of the same amplitude. It is shown that this kind of shocks leads to changes in the structure of the input-output network.

Keywords: shock, input-output network, agent-based model, computer simulation.

SYSTEM OF THEMATICALLY-ORIENTED TEXTS AUTOMATIC PROCESSING WITH DICTIONARY OF TERMS IN THE FORM OF REGULAR EXPRESSIONS 41

Sukhoverov V.S.

The system of automatic text processing is developed that determines the text subject based on the terminology used, according to the dictionary of terms. The application of regular expressions is proposed and justified in domain-specific dictionaries used in the programs of text analysis in natural languages. The interrelation of regular expressions and finite automata through regular sets is noted and described. A quantitative assessment is suggested of the thematic focus of the text investigated — the document profile, calculated

by the terms search results. The system is implemented in practice in the form of a software package with a dictionary version for the selected subject area — control theory and its applications. The system was tested on the archive of the journal «Automation and Remote Control». The profiles of the thematic focus of the articles taken from various sections of the journal were obtained. The opportunities of the system development are indicated.

Keywords: term, domain dictionary, regular expression, finite state machine, document profile, software package.

IDENTIFICATION OF AN OPERATING MODEL OF MANAGEMENT OF THE PRODUCTION COMPLEX . . . 47

Kuznetsov D.S., Kotelenko S.A., Pyatetsky V.E.

The approaches are considered to the construction of a graph operating model of management of the production complex. The graph model is proposed, consisting of several clusters, in particular, a resource cluster, a cluster of materials, and a cluster of a production calendar. It is shown that the model proposed can be used to solve such planning tasks as the construction of the master schedule for material requirements and capacity planning. It is noted that main advantages of the new model are openness for further changes, the possibility of applying graph algorithms to solve optimization problems, the compatibility with modern graph databases, the possibility for business optimization specialists to work directly with model.

Keywords: production planning, material requirements and capacity planning, integrated planning, graph operating model.

BUILDING THE ASSEMBLY LINE TIMETABLES IN SMALL- AND MEDIUM-SCALE PRODUCTION 54

Zack Yu.A.

Algorithms are given for solving the actual for small- and medium-scale production problem of building the timetables of assembly works execution for some set of products, differing by production technologies. The optimality criterion of the task formulated is the fulfillment of the whole complex of works as quickly as possible. The sequence that is the most effective for practical implementation and close to the lower estimated bound on the optimal solution is determined, as well as the assembly operations start and end times for all products at each of the assembly stations, and the completion time of the production plan fulfillment. The algorithms developed are illustrated with numerical examples.

Keywords: assembly line, optimal sequence, assembly work, scheduling algorithms.

ADAPTIVE NEURAL NETWORK TUNER OF PID-CONTROLLER FOR HEATING FURNACES CONTROL. 60

Glushchenko A.I.

The existing neural network tuner of PI-controller is improved in such a way that to be able to adjust parameters of a PID-controller. The new structure of a neural network for the tuner is defined for this purpose, its rule base is updated, and the stability criterion is proposed for the system with the tuner and the PID-controller. The new version of the tuner is applied to control a typical heating furnace during numerical and full-scale experiments in order to maintain the required quality of transients under the condition of the furnace parameters non-stationarity. It made it possible to reduce the furnace power consumption by 8,4 % through the full-scale experiments in comparison to common PID-controller.

Keywords: non-stationary heating furnaces, neural network tuner, PID-controller, sustainability, rule base.

DECISION MAKING ON AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE CHOICE FOR EFFECTIVE FUNCTIONING IN THE GROUP 70

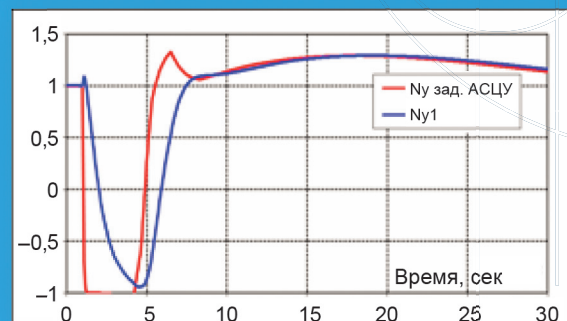
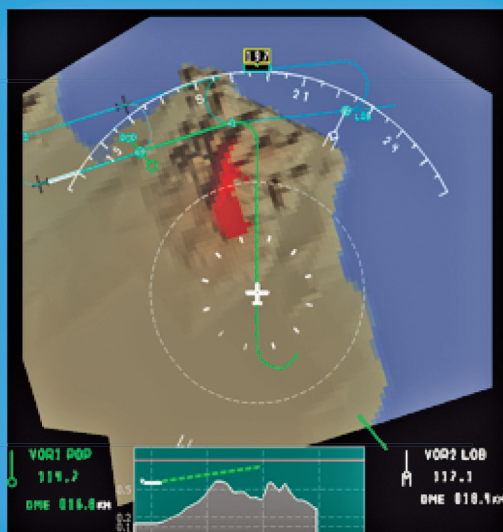
Martynova L.A., Rosengauz M.B.

The problem is considered of choosing the sample of the autonomous underwater vehicle (AUV) among the variety of types of existing underwater vehicles for use in groups. In contrast to the particular vehicle sample choice upon its contribution to the group functioning efficiency, the approach is suggested that takes into account the way the AUVs are organized within the group. The mathematical model is developed of the functioning of the group; the fuzzy logic is applied to form the efficiency parameter. Different variants of group organization (rank, swarm, flock, multi-agent system) are considered on the example of task solution of water basin survey. The advisability is shown on the results of the numerical experiment of taking into account not only the individual contribution of each vehicle to the group efficiency, but the way they are organized within the group as well.

Keywords: autonomous underwater vehicle, reliability, efficiency, decision making, fuzzy logic.

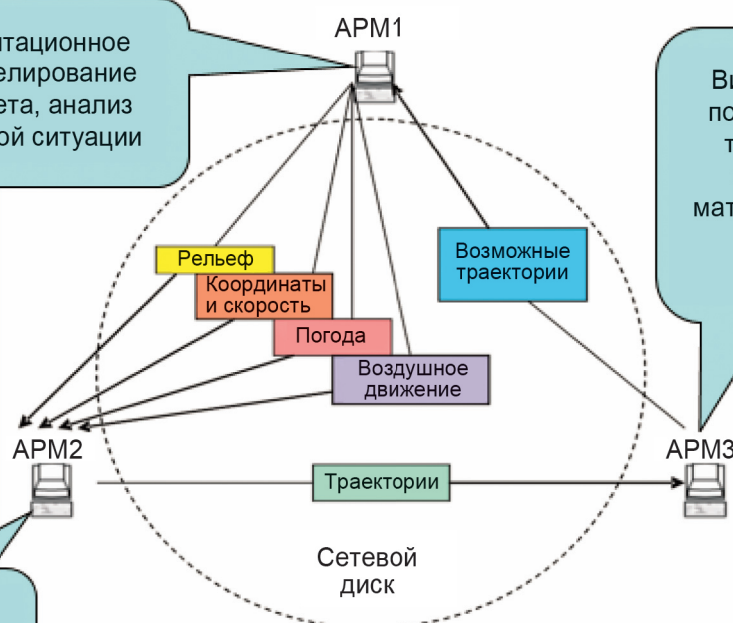
THE 11th INTERNATIONAL CONFERENCE «MANAGEMENT OF LARGE-SCALE SYSTEM DEVELOPMENT MLSD'2018» 80

СТРУКТУРА СТЕНДА МОДЕЛИРОВАНИЯ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАЕКТОРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТА

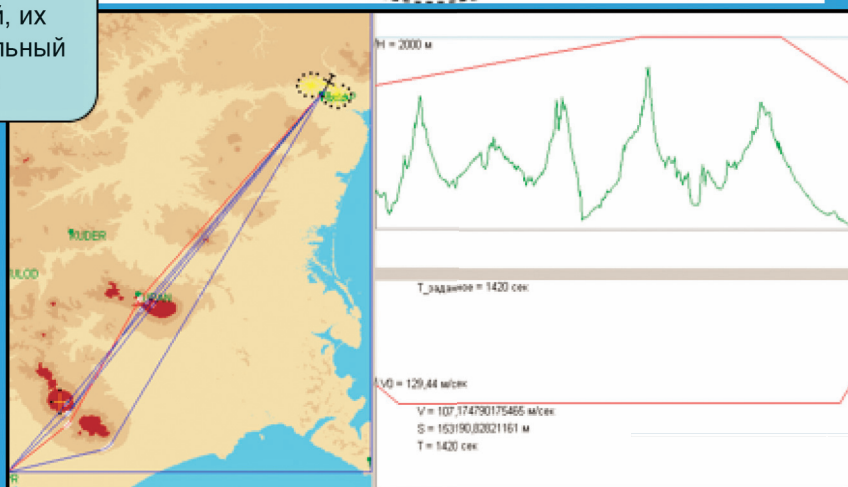


Имитационное
моделирование
полета, анализ
лётной ситуации

Виртуальные
полеты вдоль
траекторий
на основе
математической
модели
самолета



Генерация
траекторий, их
предварительный
анализ



Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН
Лаборатория систем поддержки принятия решений
Профсоюзная ул., д. 65, Москва, 117997
✉ lebedev@ipu.ru ☎ (495) 334-92-49

