

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 22

2021

№ 10

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427 (Print)

ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д.т.н.

Заместители главного редактора:
БОЛЬШАКОВ А. А., д.т.н.
ПОДУРАЕВ Ю. В., д.т.н.
ЮЩЕНКО А. С., д.т.н.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционный совет:
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН
КУРЖАНСКИЙ А. Б., акад. РАН
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН
СИГОВ А. С., акад. РАН
СОЙФЕР В. А., акад. РАН
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН
ШЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН

Редколлегия:
DORANTES D. J., PhD, Турция
GROUMPOS P. P., PhD, Греция
ISIDORI A., PhD, Италия
KATALINIC B., PhD, Австрия
LIN CH.-Y., PhD, Тайвань
MASON O. J., PhD, Ирландия
ORTEGA R. S., PhD, Франция
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, США
STRZELECKI R. M., PhD, Польша
SUBUDHI B. D., PhD, Индия
АЛИЕВ Т. А., д.т.н., Азербайджан
ГАРАЩЕНКО Ф. Г., д.т.н., Украина
БОБЦОВ А. А., д.т.н.
БУКОВ В. Н., д.т.н.
ЕРМОЛОВ И. Л., д.т.н.
ЖУКОВ И. А., д.т.н.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д.т.н.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д.т.н.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д.т.н.
ЛОХИН В. М., д.т.н.
МАГОМЕДОВ М. Х., д.ф.-м.н.
ПУТОВ В. В., д.т.н.
ПШИХОПОВ В. Х., д.т.н.
РАПОПОРТ Э. Я., д.т.н.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д.п.с.н.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д.т.н.
ФРАДКОВ А. Л., д.т.н.
ФУРСОВ В. А., д.т.н.

Редакция:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Директор издательства:
АНТОНОВ Б. И.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Быковцев Ю. А. Анализ и синтез нечеткого регулятора методом фазовой плоскости507

Бушуев А. Б., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В., Мансурова О. К. Синтез оптимальных информационно-энергетических схем измерительно-преобразовательных устройств518

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Крестовников К. Д., Ерашов А. А., Быков А. Н. Масштабируемая архитектура и структура модулей распределенной системы управления процессами промышленных тепличных комплексов527

РОБОТЫ, МЕХАТРОНИКА И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Карпова И. П. Организация маршрута анимата на основе визуальных ориентиров и распознавания сцен537

Калинин Я. В., Марчук Е. А. Особенности учета конструктивной нелинейности в модели динамики тросового робота547

ДИНАМИКА, БАЛЛИСТИКА, УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Корсун О. Н., Ом М. Х., Латт Ч. З. Определение проекций скорости ветра на основе измерений воздушной скорости, углов атаки и скольжения553

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования, а также в МНБД Scopus и RSCI (на платформе Web of Science).

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу:
<http://novtex.ru/mech>, e-mail: mech@novtex.ru

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427 (Print) ISSN 2619-1253 (Online)

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editor-in-Chief

FILIMONOV N. B.

Deputy Editors-in-Chief:

BOLSHAKOV A. A.
PODURAEV Yu. V.
YUSCHENKO A. S.

Responsible Secretary:

BEZMENOVA M. Yu.

Editorial Board:

ANSHAKOV G. P.
BOLOTNIK N. N.
CHENTSOV A. G.
CHERNOUSKO F. L.
FEDOROV I. B.
KALYAEV I. A.
KURZHANSKI A. B.
KUZNETSOV N. A.
PESHEKHONOV V. G.
REZCHIKOV A. F.
SCHERBATYUK A. F.
SEBRYAKOV G. G.
SIGOV A. S.
SOJFER V. A.
SOLOMENTSEV Yu. M.
VASSILYEV S. N.
YUSUPOV R. M.
ZHELTOV S. Yu.

Editorial Council:

ALIEV T. A., Azerbaijan
DORANTES D. J., PhD, Turkey
GARASCHENKO F. G., Ukraine
GROUMPOS P. P., PhD, Greece
ISIDORI A., PhD, Italy
KATALINIC B., PhD, Austria
LIN CH.-Y., PhD, Taiwan
MASON O. J., PhD, Ireland
ORTEGA R. S., PhD, France
SKIBNIEWSKI M. J., PhD, USA
STRZELECKI R. M., PhD, Poland
SUBUDHI B. D., PhD, India
BOBTSOV A. A.
BUKOV V. N.
ERMOLOV I. L.
FILARETOV V. F.
FRADKOV V. L.
FURSOV V. A.
ILYASOV B. G.
KOROSTELEV V. F.
LEBEDEV G. N.
LOKHIN V.M.
MAGOMEDOV M. Kh.
PUTOV V. V.
PSHIKHOPOV V. Kh.
RAPOPORT E. Ya.
SERGEEV S. F.
ZHUKOV I. A.

Editorial Staff:

BEZMENOVA M. Yu.

Director of the Publishing House:

ANTONOV B. I.

The mission of the Journal is to cover the current state, trends and prospective development of *mechatronics*, that is the priority field in the technosphere as it combines mechanics, electronics, automatics and informatics in order to improve manufacturing processes and to develop new generations of equipment. Covers topical issues of development, creation, implementation and operation of mechatronic systems and technologies in the production sector, power economy and in transport.

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS, CONTROL AND INFORMATION PROCESSING

- Bykovtsev Y. A.** Analysis and Synthesis of a Fuzzy Controller by the Phase Plane Method 507
- Bushuev A. B., Boikov V. I., Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Mansurova O. K.** Synthesis of Optimal Information and Energy Schemes of Measuring and Converting Devices 518

AUTOMATION AND CONTROL TECHNOLOGICAL PROCESSES

- Krestovnikov K. D., Erashov A. A., Bykov A. N.** Scalable Architecture and Structure of Modules for Distributed Process Control System in Industrial Greenhouse Complexes . . . 527

ROBOT, MECHATRONICS AND ROBOTIC SYSTEMS

- Karpova I. P.** Animate Orientation Based on Visual Landmarks and Scene Recognition 537
- Kalinin Ya. V., Marchuk E. A.** Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot 547

DYNAMICS, BALLISTICS AND CONTROL OF AIRCRAFT

- Korsun O. N., Om M. H., Latt K. Z.** Determination of Wind Velocity Projections Taking into Account Measurements of Airspeed, Angles of Attack and Sideslip 553

Information about the journal is available online at:
<http://novtex.ru/mech.html>, e-mail: mech@novtex.ru

Ю. А. Быковцев, аспирант, ассистент, bykovcev@mirea.ru,
МИРЭА—Российский технологический университет, Москва

Анализ и синтез нечеткого регулятора методом фазовой плоскости

Обсуждается решение задачи анализа и синтеза системы управления с нечетким регулятором методом фазовой плоскости. Нелинейное преобразование, построенное по нечеткой модели Сугено, аппроксимировано кусочно-линейной характеристикой, состоящей из трех участков: двух кусочно-линейных и одного кусочно-постоянного. Такой подход позволяет ограничиться тремя листами фазовых траекторий, каждый из которых строится на основе дифференциального уравнения второго порядка. С учетом этой особенности рассмотрена методика "сшивания" трех листов фазовых траекторий и получена аналитическая база, позволяющая определить условия "сшивания" фазовых траекторий для различных вариантов кусочно-линейной аппроксимации характеристики нечеткого регулятора. Ввиду специфики используемой аппроксимированной модели нечеткого регулятора приведены полезные аналитические соотношения, с помощью которых можно вычислить время движения изображающей точки по каждому участку с привлечением аппарата численной оптимизации. Для варианта аппроксимации из трех участков предложена методика синтеза нечеткого регулятора, позволяющая определить область параметров и диапазон входных сигналов, при которых обеспечивается аperiodический процесс и заданное время регулирования. На модели системы автоматического управления приводным уровнем мехатронного модуля показано, что исследование нечеткой системы по такой аппроксимированной характеристике нечеткого регулятора дает вполне достоверные результаты. Проведенные исследования влияния степени аппроксимации на качество управления показывают, что аппроксимированная характеристика нечеткого регулятора дает незначительное ухудшение качества по сравнению с гладкой характеристикой нечеткого регулятора. Поскольку возможности метода фазовой плоскости ограничены вторым порядком линейной части системы автоматического управления, то на примере привода мехатронного модуля рассмотрено влияние третьего порядка на динамику системы. Показано, что учет электрической постоянной времени приводит к перерегулированию в пределах 5...10 %. Такое перерегулирование может быть устранено за счет предложенных рекомендаций по коррекции статической характеристики нечеткого регулятора.

Ключевые слова: анализ, синтез, нечеткий регулятор, фазовая плоскость, нечеткая модель Сугено

Введение

Практика последних двух десятилетий показывает, что область применения нечетких регуляторов постепенно расширяется от первых вариантов бытовой *fuzzy*-техники до роботов и беспилотных летательных аппаратов [1—3, 10—16]. Несмотря на то, что такие регуляторы обладают рядом интересных свойств, которые позволяют рассматривать их как вполне перспективную альтернативу традиционным ПИД регуляторам, процесс внедрения происходит достаточно медленно. Объясняется это, с одной стороны, отсутствием отработанных аппаратных решений, а с другой — отсутствием удобных инженерных методик анализа и синтеза САУ с нечеткими регуляторами (НР). Несмотря на появление фундаментальных работ типа [4—7], проблема создания инженерных методик остается актуальной.

В настоящей статье САУ с НР рассматриваются с позиции нелинейных систем и показана воз-

можность достаточно эффективного применения метода фазовой плоскости для синтеза НР.

Структурная схема САУ с аппроксимированной моделью НР

Структурная схема САУ с НР представлена на рис. 1. В качестве практического прототипа такой системы может рассматриваться мехатронный модуль на базе двигателя постоянного тока, и, соответственно, линейная часть (ЛЧ) (с учетом ограничений метода фазовой плоскости) описана передаточной функцией второго порядка $W_{\text{лч}}(p) = \frac{K_{\text{л}}}{p(1 + pT)}$.

В подавляющем большинстве работ, посвященных синтезу НР, при подборе параметров используется обобщение экспертных знаний, не учитывающих конкретные требования к качеству САУ, хотя именно здесь заложен большой резерв возможностей НР.

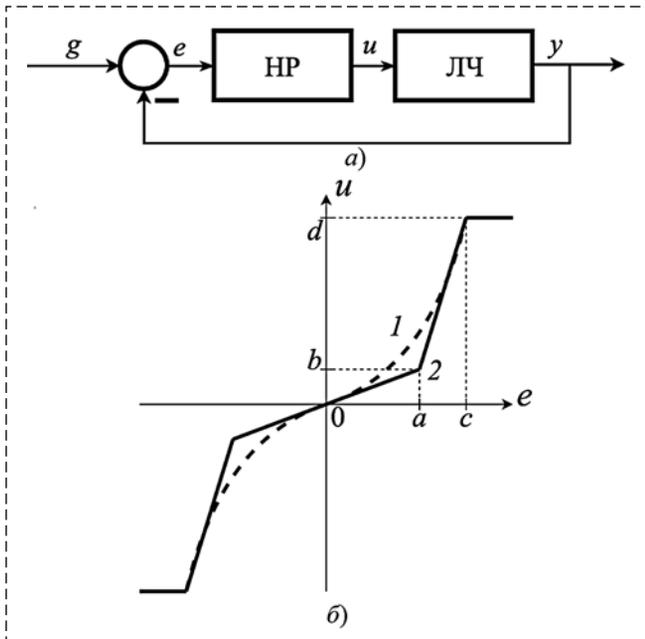


Рис. 1. Структурная схема САУ с НР (а) и статическая характеристика НР (1 — исходная, 2 — аппроксимированная) (б)
 Fig. 1. Structural scheme of ACS with FR (a) and static characteristic of FR (1 — initial, 2 — approximated) (b)

Действительно, более глубокий анализ характеристик НР показывает, что:

- НР (с позиции описания его как элемента САУ) является статическим нелинейным элементом (НЭ);
- меняя параметры нечеткого логического вывода (НЛВ), можно менять вид нелинейной характеристики НР $u(e)$ и, соответственно, менять характер управляющего воздействия, подаваемого на ЛЧ;
- при внимательном рассмотрении НЭ видно, что удобно аппроксимировать его характеристику, выделив два участка аппроксимации (рис. 1, б). Полученная характеристика не только объясняет потенциальные возможности НР по улучшению качества управления, но и показывает возможность применения известных в теории автоматического управления инженерных методов для анализа и синтеза САУ с НР.

На рис. 1, б показан наиболее простой способ аппроксимации НЭ на основе двух кусочно-линейных функций и одной кусочно-постоянной. Как видно, такого простого решения по построению фазовых портретов системы, как в случае с релейными системами (где релейные характеристики имеют кусочно-постоянный характер), получить не удастся, но тем не менее придется исследовать (в соответствии с тремя участками аппроксимации) три листа

фазовых траекторий. На аппроксимированной характеристике НР обозначим точки переключения с одного линейного участка на другой, тогда на участке $[0, a]$ НР имеет малый коэффициент усиления $K_1 = \frac{b}{a}$, на участке $[a, c]$ — большой коэффициент усиления $K_2 = \frac{d-b}{c-a}$, а на участке $[c, \infty]$ — насыщение с постоянным уровнем $u = d$.

Развивая для данного класса нелинейных моделей метод фазовой плоскости, будем решать задачу синтеза параметров НР (или параметров нелинейного преобразования $u(e)$, соответствующего нечеткой модели Сугено) в заданном диапазоне входных воздействий.

Фазовая плоскость САУ с НР

Составим дифференциальные уравнения (ДУ), описывающие движение изображающей точки на каждом из участков нелинейной характеристики НР.

Если $e \in [0, a]$, то система описывается линейным однородным ДУ 2-го порядка:

$$T \frac{d^2 e}{dt^2} + \frac{de}{dt} + K_a K_1 e = 0, \quad (1)$$

где K_a — коэффициент усиления линейной части.

Введем замену переменных $e = x_1$, $x_2 = \frac{dx_1}{dt}$. Тогда уравнение (1) преобразуется в систему

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} = -\frac{K_1 K_a}{T} x_1 - \frac{1}{T} x_2. \end{cases} \quad (2)$$

Система (2) имеет единственное положение равновесия (особую точку) в начале координат $(0, 0)$. В зависимости от значений коэффициента K_1 возможны три варианта особой точки:

- если $K_1 > \frac{1}{4K_a T}$, то особая точка — устойчивый фокус;
- если $K_1 = \frac{1}{4K_a T}$, то особая точка — устойчивый вырожденный узел;
- если $K_1 < \frac{1}{4K_a T}$, то особая точка — устойчивый узел.

Разделив в системе (2) второе уравнение на первое, получим уравнение касательных к фазовым траекториям:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-K_1 K_a x_1 - x_2}{T x_2}. \quad (3)$$

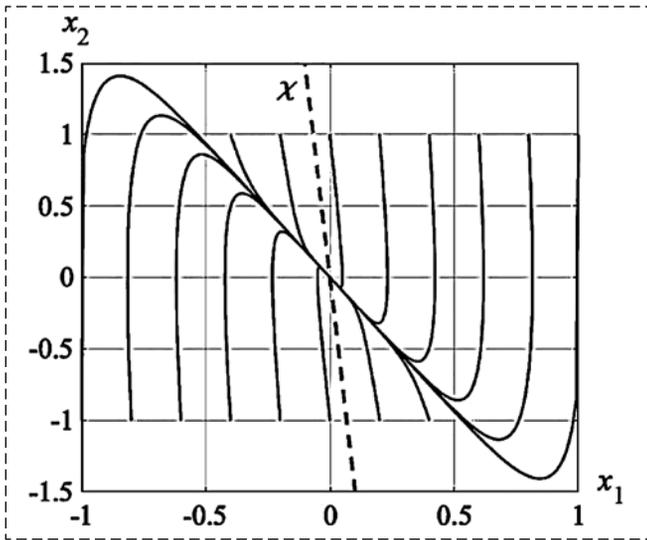


Рис. 2. Фазовый портрет, соответствующий особой точке типа "устойчивый узел"

Fig. 2. Phase portrait corresponding to equilibrium point of the "sink" type

Для особых точек "узел" и "устойчивый узел" на фазовом пространстве имеет место фазовая траектория, касательная к которой постоянна и проходит через особую точку (точку с координатами (0; 0)) (рис. 2). Тогда должно существовать такое число χ , что

$$\begin{cases} x_2 = \chi x_1; \\ \frac{dx_2}{dx_1} = \chi. \end{cases} \quad (4)$$

Фазовая траектория, совпадающая с $x_2 = \chi x_1$, является предельной для обеспечения аperiodического процесса, а фазовые траектории, лежащие ниже предельной, будут соответствовать режиму перерегулирования в системе.

Подставляя соотношения (4) в уравнение (3) и решая получившееся уравнение относительно χ , находим минимальный действительный корень

$$\chi = \frac{-1 - \sqrt{1 - 4TK_a K_1}}{2T}.$$

Таким образом, для обеспечения процессов в САУ без перерегулирования необходимо, чтобы при достижении фазовой траекторией границ участка малого коэффициента усиления НР производная ошибки x_2 удовлетворяла условию

$$x_2 \geq -x_1 \frac{1 + \sqrt{1 - 4TK_a K_1}}{2T}, \quad (5)$$

где $K_1 \leq \frac{1}{4TK_a}$.

Неравенство (5) определяет условия "сшивания" двух фазовых портретов при изменении коэффициента усиления НР с K_2 на K_1 , при котором обеспечивается аperiodический переходной процесс.

На участке большого коэффициента усиления вход-выход НР описывается уравнением $u(e) = K_2(e - a) + b$, а уравнение, описывающее динамику системы на данном участке, имеет вид

$$T \frac{d^2 e}{dt^2} + \frac{de}{dt} + K_2 K_a e = K_2 K_a a - K_a b. \quad (6)$$

Проводя вычисления по аналогии с (1) и (2) и вводя переменные $x_1 = t + a - \frac{b}{K_2}$, $x_2 = u(t)$, получим однородное ДУ 1-го порядка

$$\frac{du}{dt} = -\frac{K_2 K_a t + u}{Tu}. \quad (7)$$

Уравнение (7) решается стандартной заменой $u = zt$, $\frac{du}{dt} = z't + z$ и, после подстановки замены и разделения переменных, приводится к виду

$$\frac{zdz}{z^2 + \frac{z}{T} + \frac{K_2 K_a}{T}} = -\frac{dt}{t}. \quad (8)$$

В зависимости от вида корней знаменателя левой части (8) возможны три ситуации разложения последнего в сумму:

1. $0 < K_2 < \frac{1}{4K_a T}$. Тогда $z_1 \neq z_2$; $\text{Im}(z_1) = \text{Im}(z_2) = 0$; $z_1 < 0, z_2 < 0$, и особая точка соответствует устойчивому узлу. Решение уравнения (8) в таком случае имеет вид

$$\begin{aligned} A \ln \left| z + \frac{1 - T\sqrt{D}}{2T} \right| + B \ln \left| z + \frac{1 + T\sqrt{D}}{2T} \right| = \\ = -\ln \left| x_1 + \frac{b}{K_2} - a \right| + \ln C, \end{aligned} \quad (9)$$

где $A = \frac{-1 + T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}}$, $B = \frac{1 + T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}}$, $D = \frac{1}{T^2} - \frac{4K_a K_2}{T}$.

2. $K_2 = \frac{1}{4K_a T}$. Тогда $z_1 = z_2$; $\text{Im}(z_1) = \text{Im}(z_2) = 0$; $z_{1,2} < 0$, и особая точка соответствует вырожденному устойчивому узлу. Решение уравнения (8) в таком случае имеет вид

$$\ln \left| z + \frac{T}{2} \right| + \frac{T}{2z + T} = -\ln \left| x_1 + \frac{b}{K_2} - a \right| + \ln C. \quad (10)$$

3. $K_2 > \frac{1}{4K_a T}$. Тогда $z_1 \neq z_2$; $\text{Im}(z_1) \neq 0$, $\text{Im}(z_2) \neq 0$; $\text{Re}(z_1) < 0, \text{Re}(z_2) < 0$, и особая точка

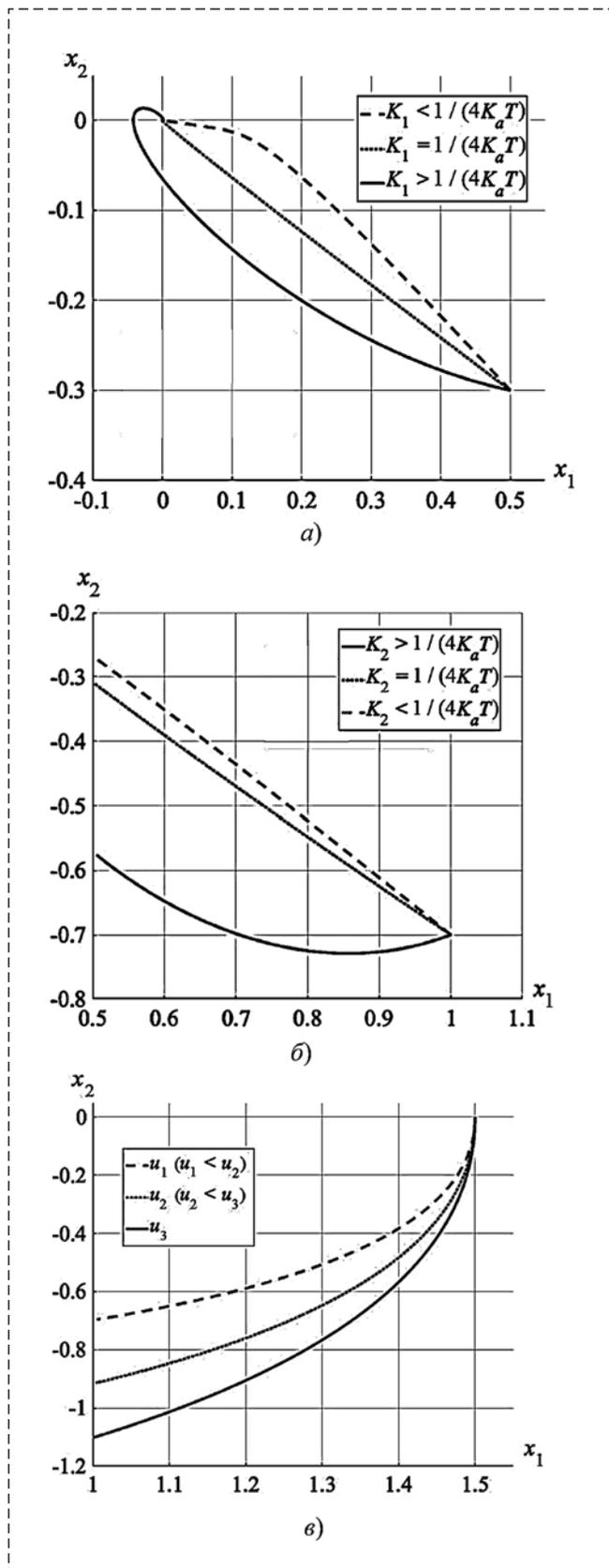


Рис. 3. Фазовые траектории для трех участков аппроксимированной нелинейной характеристики НР (малого коэффициента усиления (а), большого (б) и насыщения (в))
 Fig. 3. Phase trajectories for three sections of the approximated nonlinear characteristics of the FR (small gain (a), big gain (b) and saturation (c))

соответствует устойчивому фокусу. С учетом связи логарифма комплексного числа с обратными тригонометрическими функциями получаем решение уравнения (8) в следующем виде:

$$\frac{1}{2} \ln \left(z^2 + \frac{z}{T} + \frac{K_a K_2}{T} \right) - \frac{1}{T\sqrt{-D}} \arctg \left(\frac{2Tz+1}{T\sqrt{-D}} \right) = -\ln \left| x_1 + \frac{b}{K_2} - a \right| + \ln C, \quad (11)$$

где $D = \frac{1}{T^2} - \frac{4K_a K_2}{T}$.

Уравнения (9)–(11) задают на фазовом пространстве семейство траекторий движения изображающей точки системы при работе НР на участке с коэффициентом усиления K_2 .

Третьим участком характеристики НР является зона насыщения $u(e) = d$ (при $e \in [c; \infty]$), система при этом описывается ДУ 2-го порядка

$$T \frac{d^2 e}{dt^2} + \frac{de}{dt} = -K_a d, \quad (12)$$

решение которого имеет вид

$$dK_a \ln |x_2 + dK_a| - Tx_2 = x_1 + C. \quad (13)$$

Полученные аналитические зависимости для фазовых траекторий на каждом из участков аппроксимированной нелинейной характеристики НР позволяют полностью описать процессы в рассматриваемой нечеткой системе. На рис. 3 показаны фазовые траектории для трех участков аппроксимации при различных значениях K_1 , K_2 , u .

Сшивание фазовых траекторий

Развиваемый в статье подход к синтезу НР базируется на широко известном методе "припасовывания" и состоит в последовательном определении условий "сшивания" фазовых листов для выбранной аппроксимированной характеристики НР в направлении от положения равновесия к началу движения изображающей точки. При этом считается, что на момент начала движения система находилась в состоянии покоя, т. е. $x_2 = 0$. Введем параметр $\Theta = (x_1; x_2)$, определяющий условия сшивания двух фазовых листов, причем $\Theta^l = (x_1^l; x_2^l)$ задает условия сшивания текущего фазового листа с предыдущим, а $\Theta^r = (x_1^r; x_2^r)$ — текущего со следующим. Необходимо отметить, что так как сшивание фазовых траекторий происходит при движении слева направо по фазовому портрету, параметр Θ^l всегда известен, а Θ^r опреде-

ляется для кусочно-линейного участка из уравнений (11)–(13), а для кусочно-постоянного участка — из уравнения (15). Для этого сначала по известному Θ' находится свободный член C , а затем по нему находятся значения Θ'' . В рамках данной статьи, как было сказано ранее, характеристика НР аппроксимируется двумя кусочно-линейными участками и одним кусочно-постоянным, поэтому границы "сшивания" известны заранее. Для кусочно-линейного участка $x_1^l = a$, $x_1^r = c$, и связь между x_2^l и x_2^r выражается следующими уравнениями:

$$1. 0 < K_2 < \frac{1}{4K_a T}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \frac{-1+T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}} \ln \left| \frac{K_2 x_2^l}{b} + \frac{1-T\sqrt{D}}{2T} \right| + \\ & + \frac{1+T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}} \ln \left| \frac{K_2 x_2^l}{b} + \frac{1+T\sqrt{D}}{2T} \right| + \ln \left| \frac{b}{d} \right| = \\ & = \frac{-1+T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}} \ln \left| \frac{K_2 x_2^r}{d} + \frac{1-T\sqrt{D}}{2T} \right| + \\ & + \frac{1+T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}} \ln \left| \frac{K_2 x_2^r}{d} + \frac{1+T\sqrt{D}}{2T} \right|, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{где } D = \frac{1}{T^2} - \frac{4K_a K_2}{T}.$$

$$2. K_2 = \frac{1}{4K_a T}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \ln \left| \frac{K_2 x_2^l}{b} + \frac{T}{2} \right| + \frac{Tb}{2K_2 x_2^l + Tb} + \ln \left| \frac{b}{d} \right| = \\ & = \ln \left| \frac{K_2 x_2^r}{d} + \frac{T}{2} \right| + \frac{Td}{2K_2 x_2^r + Td}. \end{aligned} \quad (15)$$

$$3. K_2 > \frac{1}{4K_a T}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \ln \left(\left(\frac{K_2 x_2^l}{b} \right)^2 + \frac{K_2 x_2^l}{Tb} + \frac{K_a K_2}{T} \right) - \\ & - \frac{2}{T\sqrt{-D}} \operatorname{arctg} \left(\frac{2TK_2 x_2^l + b}{bT\sqrt{-D}} \right) + 2 \ln \left| \frac{b}{d} \right| = \\ & = \ln \left(\left(\frac{K_2 x_2^r}{d} \right)^2 + \frac{K_2 x_2^r}{Td} + \frac{K_a K_2}{T} \right) - \\ & - \frac{2}{T\sqrt{-D}} \operatorname{arctg} \left(\frac{2TK_2 x_2^r + d}{dT\sqrt{-D}} \right), \end{aligned} \quad (16)$$

$$\text{где } D = \frac{1}{T^2} - \frac{4K_a K_2}{T}.$$

Необходимо отметить, что значения x_2^l , удовлетворяющего уравнениям (14)–(16), в общем случае может не существовать, соответственно, отсутствуют и условия "сшивания" Θ'' .

Учитывая, что в исходной постановке задачи процесс в системе начинается с нулевым значением производной ($x_2^r = 0$) (рис. 4, см. вторую сторону обложки), для упрощения описания методики настройки НР приведем соотношения, связывающие x_1^r и x_2^l . Для участка НР с коэффициентом усиления K_2 они имеют вид:

$$1. 0 < K_2 < \frac{1}{4K_a T}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \frac{-1+T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}} \ln \left| \frac{K_2 x_2^l}{b} + \frac{1-T\sqrt{D}}{2T} \right| + \\ & + \frac{1+T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}} \ln \left| \frac{K_2 x_2^l}{b} + \frac{1+T\sqrt{D}}{2T} \right| + \ln \left| \frac{b}{K_2} \right| = \\ & = \frac{-1+T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}} \ln \left| \frac{1-T\sqrt{D}}{2T} \right| + \\ & + \frac{1+T\sqrt{D}}{2T\sqrt{D}} \ln \left| \frac{1+T\sqrt{D}}{2T} \right| + \ln \left| x_1^r - a + \frac{b}{K_2} \right|, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\text{где } D = \frac{1}{T^2} - \frac{4K_a K_2}{T}.$$

$$2. K_2 = \frac{1}{4K_a T}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \ln \left| \frac{K_2 x_2^l}{b} + \frac{T}{2} \right| + \frac{Tb}{2K_2 x_2^l + Tb} + \ln \left| \frac{b}{K_2} \right| = \\ & = \ln \left| \frac{T}{2} \right| + 1 + \ln \left| x_1^r - a + \frac{b}{K_2} \right|. \end{aligned} \quad (18)$$

$$3. K_2 > \frac{1}{4K_a T}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} & \ln \left(\left(\frac{K_2 x_2^l}{b} \right)^2 + \frac{K_2 x_2^l}{Tb} + \frac{K_a K_2}{T} \right) - \\ & - \frac{2}{T\sqrt{-D}} \operatorname{arctg} \left(\frac{2TK_2 x_2^l + b}{bT\sqrt{-D}} \right) + 2 \ln \left| \frac{b}{K_2} \right| = \\ & = \ln \left(\frac{K_a K_2}{T} \right) - \frac{2}{T\sqrt{-D}} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{T\sqrt{-D}} \right) + \\ & + 2 \ln \left| x_1^r - a + \frac{b}{K_2} \right|, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{где } D = \frac{1}{T^2} - \frac{4K_a K_2}{T}.$$

Для участка насыщения

$$x_1^r = T x_2^l - d K_a T \ln \left| \frac{x_2^l}{d K_a} + 1 \right| + c. \quad (20)$$

Поскольку фазовая траектория движения нечеткой системы строится путем "сшивания" фазовых траекторий, соответствующих трем участкам аппроксимированной кусочно-линейной характеристики НР, то время регулирования есть сумма интервалов времени, затрачиваемых изображающей точкой на прохождение каждого из участков. Используемый в данной статье подход состоит в последовательном определении этих интервалов на основе решений ДУ, описывающих динамику системы на каждом участке, начиная от точки начальных условий движения до положения равновесия. С учетом специфики используемой аппроксимированной модели НР приведем полезные соотношения, с помощью которых можно вычислить время движения изображающей точки по каждому участку. Для участка с коэффициентом усиления K_1 :

$$1. 0 \leq K_1 < \frac{1}{4K_a T} : \begin{cases} x_1^l = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t}; \\ C_1 = \frac{x_2^r - \lambda_2 x_1^r}{\lambda_1 - \lambda_2}; \\ C_2 = \frac{x_2^r - \lambda_1 x_1^r}{\lambda_2 - \lambda_1}, \end{cases} \quad (21)$$

где $\lambda_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{D}}{2T}$, $D = 1 - 4K_1 K_a T$.

$$2. K_1 = \frac{1}{4K_a T} : \begin{cases} x_1^l = (C_1 t + C_2) e^{-\frac{t}{2T}}; \\ C_1 = x_2^r + \frac{x_1^r}{2T}; \\ C_2 = x_1^r. \end{cases} \quad (22)$$

Для участка с коэффициентом усиления K_2 :

$$1. 0 \leq K_2 < \frac{1}{4K_a T} : \begin{cases} x_1^l = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + g; \\ C_1 = \frac{x_2^r + \lambda_2(g - x_1^r)}{\lambda_1 - \lambda_2}; \\ C_2 = \frac{x_2^r + \lambda_1(g - x_1^r)}{\lambda_2 - \lambda_1}. \end{cases} \quad (23)$$

$$2. K_2 = \frac{1}{4K_a T} : \begin{cases} x_1^l = (C_1 t + C_2) e^{-\frac{t}{2T}} + g; \\ C_1 = x_2^r + \frac{x_1^r - g}{2T}; \\ C_2 = x_1^r - g. \end{cases} \quad (24)$$

$$3. K_2 > \frac{1}{4K_a T} : \begin{cases} x_1(t) = e^{-\frac{t}{2T}} \left(C_1 \cos\left(\frac{t\sqrt{-D}}{2T}\right) + \right. \\ \left. + C_2 \sin\left(\frac{t\sqrt{-D}}{2T}\right) \right) + g; \\ C_1 = x_1^r - g; \\ C_2 = \frac{2Tx_2^r + x_1^r}{\sqrt{-D}}, \end{cases} \quad (25)$$

где $\lambda_{1,2} = \frac{-1 \pm \sqrt{D}}{2T}$, $D = 1 - 4K_1 K_a T$, $g = a - \frac{b}{K_2}$.

Для участка насыщения:

$$\begin{cases} x_1^l = C_1 + C_2 e^{-\frac{t}{T}} - dK_a t; \\ C_1 = x_1^r + Tx_2^r + dK_a T; \\ C_2 = -Tx_2^r - dK_a T. \end{cases} \quad (26)$$

Следует отметить, что время в полученных уравнениях содержится в неявном виде, что затрудняет его определение, однако с привлечением методов численной оптимизации эта задача может быть успешно решена.

Алгоритм настройки НР на основе метода фазовой плоскости

При обсуждении алгоритма настройки НР будем полагать, что в САУ с НР требуется обеспечить апериодический переходной процесс в некотором диапазоне задающих воздействий ($g_{\min} \div g_{\max}$). На фазовом пространстве каждому задающему воздействию будет соответствовать своя фазовая траектория, причем, как известно, эти фазовые траектории не пересекаются. Это означает, что если синтезированный НР обеспечивает апериодический переходной процесс для g_{\max} , то для любого задающего воздействия $g \leq g_{\max}$ процесс в системе будет апериодическим.

На рис. 5, а (см. вторую сторону обложки) показана предельная фазовая траектория, соответствующая апериодическому переходному процессу для некоторого НР. В частном случае, когда необходимо обеспечить апериодический переходной процесс для любого значения задающего воздействия, "сшивание" фазовых траекторий можно выполнять "классически" справа налево, причем сшивание фазового листа, соответствующего движению изображающей точки на участке насыщения, с соседним фазовым листом необходимо проводить на

уровне (или ниже) асимптоты фазовых траекторий (рис. 5, б, см. вторую сторону обложки).

Пусть параметры линейной части системы управления определены, известно максимальное задающее воздействие g , а сама система на момент подачи задающего воздействия находится в состоянии покоя (т. е. $x_2 = 0$). Тогда для синтеза НР, обеспечивающего апериодический переходной процесс, предлагается использовать следующий алгоритм:

1. На аппроксимированной характеристике НР (см. рис. 1, а) задать начальные значения для параметров a , b и d . Рекомендуется выбирать начальные значения a и b минимальными, при этом соблюдая соотношение $b \leq \frac{a}{4TK_a}$. Значение d задать равным максимально допустимому управляющему воздействию на объект управления, c — максимальному задающему воздействию (g).

$$2. \text{ Рассчитать } K_1 = \frac{b}{a} \text{ и } K_2 = \frac{d-b}{c-a}.$$

3. По уравнению (5) рассчитать минимальное значение $x_2^{K_1}$ при $x_1 = a$.

4. По уравнениям (17)—(19) в зависимости от K_2 найти значение x_1^r при $x_2^l = x_2^{K_1}$, определенном на шаге 3. Если x_1^r меньше c , то перейти к шагу 7.

5. По уравнениям (14)—(16) в зависимости от K_2 найти значение x_2^r при $x_2^l = x_2^{K_1}$.

6. По уравнению (20) определить значение x_1^r при $x_2^l = x_2^r$.

7. Если x_1^r больше максимального значения задающего воздействия, то текущие значения a , b , c и d являются искомыми параметрами нелинейной характеристики НР, и алгоритм на этом завершается. Если x_1^r меньше, то необходимо увеличить b и перейти шагу 2. Если при увеличении b соотношение $b \leq \frac{a}{4TK_a}$ нарушается, то необходимо увеличить значение a , величину b принять минимальной и перейти к шагу 2. Если при увеличении a его значение превышает максимальное задающее воздействие, то необходимо увеличить c , значения a и b сделать минимальными и перейти к шагу 2. Критерием остановки алгоритма (помимо указанного в начале пункта) является ситуация, когда $\frac{d}{c} \leq \frac{1}{4TK_a}$ — в этом случае необходимо изменить начальное значение d и заново начать алгоритм.

Если помимо апериодического переходного процесса стоит также требование по обе-

спечению времени регулирования $t_{\text{рег}}$ для задающего воздействия g^* не больше заданного $t_{\text{рег}}^{\text{зад}}$, то после завершения расчета по алгоритму, представленному выше, необходимо рассчитать время регулирования по следующему алгоритму:

1. Приравнять $x_1^r = g^*$ и $x_2^r = 0$.

2. Если $x_1^r \leq c$, то перейти к следующему шагу, иначе исходя из начальных условий по уравнению (20) определить x_2^l , а из уравнения (26) определить время t_i при $x_1^l = c$. Добавить это время к общему времени регулирования. Приравнять $x_1^r = c$, $x_2^r = x_2^l$ и перейти к следующему шагу.

3. Если $x_1^r \leq a$, то перейти к следующему шагу, иначе по уравнениям (14)—(16) (если $x_2^r \neq 0$) или по уравнениям (17)—(19) (если $x_2^r = 0$) определить x_2^l , а из уравнений (23)—(25) определить время t_i при $x_1^l = a$. Добавить это время к общему времени регулирования. Приравнять $x_1^r = a$ и $x_2^r = x_2^l$ и перейти к следующему шагу.

4. По уравнениям (21)—(22) вычислить время t_i , при $x_1^l = 0,05g^*$ (время до попадания в 5 %-ный "коридор") добавить это время к общему времени регулирования. Алгоритм на этом завершен.

Если полученное время регулирования $t_{\text{рег}}$ больше заданного $t_{\text{рег}}^{\text{зад}}$, то необходимо продолжить определение параметров нелинейной характеристики регулятора исходя из предложенного алгоритма.

Экспериментальные исследования, как отмечалось в начале статьи, проводятся на базе приводного уровня мехатронного робота с передаточной функцией

$$\frac{K_d}{p(1+pT)},$$

где $K_d = 1$, $T = 0,5$.

На рис. 6 представлено сравнение переходного процесса в САУ с НР, синтезированным по описанной выше методике, с линейным регулятором, обеспечивающим максимальную степень устойчивости [8]. Аппроксимированная характеристика НР в соответствии с описанным алгоритмом имеет следующие параметры: $a = 0,7$, $b = 0,22$, $c = 1,3$, $d = 7$. Из рис. 6 видно, что хоть оба регулятора обеспечивают апериодический процесс, учет особенностей нелинейной характеристики НР в предлагаемом алгоритме позволил уменьшить время регулирования более чем в два раза (до 2,2 с).

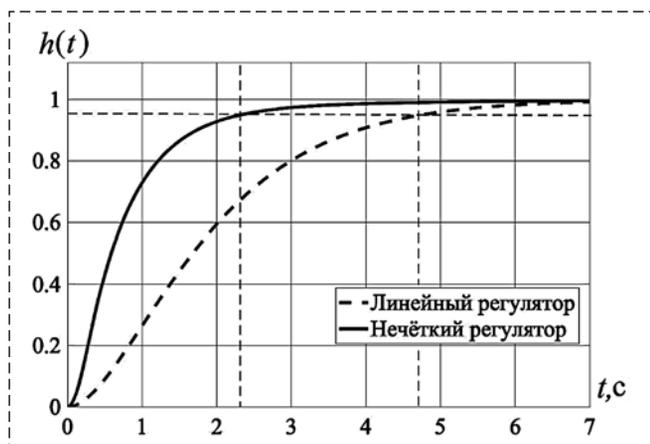


Рис. 6. Переходные процессы в САУ с линейным регулятором и синтезированным НР

Fig. 6. Transient processes in the ACS with a linear regulator and a synthesized FR

Покажем, как посредством механизма нечеткого логического вывода Сугено синтезировать НР с указанными выше параметрами. Для входной лингвистической переменной "ОШИБКА" зададим множество из пяти значений: "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", "НУЛЕВАЯ", "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" и "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ". Для значений "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ" и "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" будем использовать функции принадлежности (ФП) трапецевидной формы, для остальных — треугольной. При расположении функций принадлежности необходимо придерживаться следующего алгоритма:

1. Расположить вершину ФП термы "НУЛЕВАЯ" над нулем, а боковые границы на значениях a и $-a$ соответственно.

2. Расположить вершину ФП термы "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" над a , а боковые границы на значениях 0 , c соответственно.

3. Расположить левую вершину ФП термы "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ" над c , а левую границу на значении a .

4. Повторить шаги 2 и 3 симметрично на отрицательном отрезке входного диапазона.

На рис. 7, а показано расположение функций принадлежности входных терм, отвечающих алгоритму, описанному выше (μ — степень принадлежности). Выходная лингвистическая переменная "НАПРЯЖЕНИЕ" также имеет пять лингвистических значений — "БОЛЬШОЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ", "ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ", "НУЛЕВОЕ", "ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ" и "БОЛЬШОЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ", — функции принадлежности которых зададим в виде константных значений. При этом ФП терм "ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ" и "ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ" имеют значения b и $-b$ соответственно, термы "БОЛЬШОЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ" и "БОЛЬШОЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ" — значения d и $-d$. ФП термы "НУЛЕВОЕ" имеет значение нуль. Зададим продукционные правила в следующем виде:

- если "ОШИБКА" есть "БОЛЬШАЯ ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то "НАПРЯЖЕНИЕ" есть "БОЛЬШОЕ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ";
- если "ОШИБКА" есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНАЯ", то "НАПРЯЖЕНИЕ" есть "ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ";
- если "ОШИБКА" есть "НУЛЕВАЯ", то "НАПРЯЖЕНИЕ" есть "НУЛЕВОЕ";
- если "ОШИБКА" есть "ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то "НАПРЯЖЕНИЕ" есть "ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ";

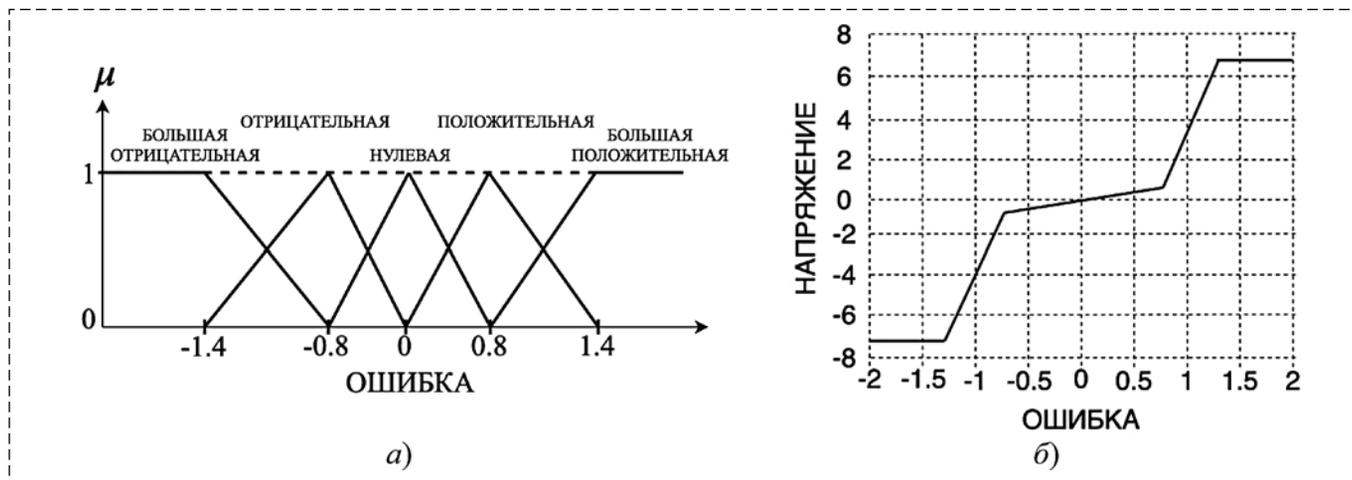


Рис. 7. Расположение входных терм (а) и нелинейная характеристика синтезированного нечеткого регулятора (б)

Fig. 7. The location of the input terms (a) and the nonlinear characteristic of the synthesized fuzzy regulator (b)

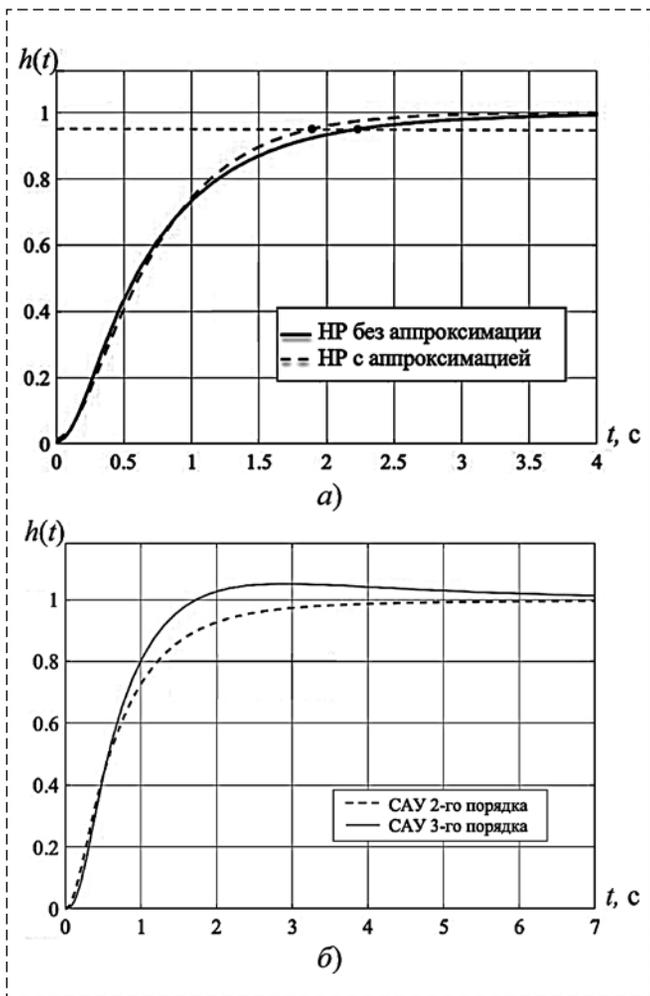


Рис. 8. Переходные процессы в САУ с аппроксимированным НР и НР без аппроксимации (а) и переходные процессы в нечеткой САУ 2-го порядка и 3-го порядка (б)

Fig. 8. Transient processes in an ACS with an approximated FR and FR without approximation (a) and transients in a fuzzy ACS of the 2nd order and 3rd order (b)

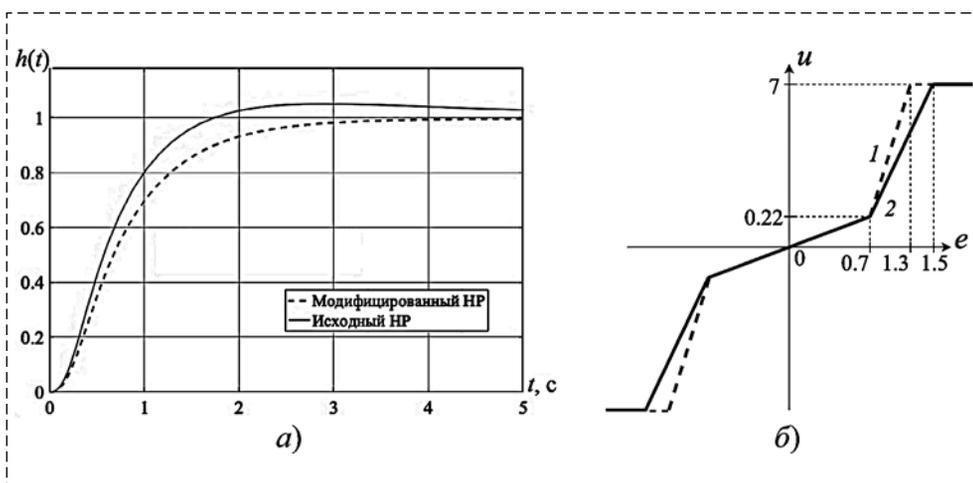


Рис. 9. Сравнение переходные процессы в нечетких САУ (а) при двух видах статических характеристик НР (б)

Fig. 9. Comparison of transient processes in fuzzy ACS (a) with two types of static characteristics of NR (b)

- если "ОШИБКА" есть "БОЛЬШАЯ ОТРИЦАТЕЛЬНАЯ", то "НАПРЯЖЕНИЕ" есть "БОЛЬШОЕ ОТРИЦАТЕЛЬНОЕ".

На рис. 7, б показан вид конечного нелинейного преобразования, реализуемого НР, полученного с помощью вышеописанной процедуры. Из рисунка видно, что статическая характеристики регулятора полностью согласуется с полученными на этапе синтеза НР параметрами a , b , c и d . Заметим, что используя метод Сугено и руководствуясь предложенными рекомендациями по расположению функций принадлежности и структуре продукционных правил, удается получить характеристику НР кусочно-линейного характера, и нет необходимости ее аппроксимировать, как в случае использования метода Мамдани.

Аппроксимирование нелинейной характеристики НР, разумеется, упрощает анализ и синтез нечеткой САУ, но в то же время "углубляет" систему, вследствие чего возникает вопрос достаточности используемой аппроксимации. На рис. 8, а приведено сравнение переходных процессов в САУ с НР с аппроксимированной характеристикой и без аппроксимации. Из рис. 8, а видно, что разница незначительна и может быть использована (при необходимости) как инструмент более точной настройки НР под заданные требования.

Помимо исследования влияния аппроксимации на качество управления дополнительного анализа требует оценка качества САУ при повышении порядка линейной части. Такая задача продиктована ограничениями метода фазовой плоскости, что может существенно сказаться на качестве САУ реальными объектами, которые в большинстве случаев описываются ДУ выше 2-го порядка. Так, рассматриваемый приводной уровень мехатронного робота помимо механической постоянной времени содержит и электрическую, которая обычно примерно на порядок меньше. На рис. 8, б приведено сравнение переходных процессов в нечетких

САУ второго и третьего порядка. Из рис. 8, б видно, что повышение порядка линейной части ухудшает качество регулирования, однако значение перерегулирования не превышает 5 %, что является допустимым в большинстве реальных САУ.

Повышение качества управления, если оно необходимо, может быть достигнуто за счет уменьшения коэффициента усиления K_2 в статической характеристике НР или уменьшения уровня насыщения u . На рис. 9, а представлено сравнение переходных процессов в нечетких САУ 3-го порядка с исходным и скорректированным НР (с уменьшенным значением K_2), а на рис. 9, б — сравнение статических характеристик этих НР (1 — исходная, 2 — скорректированная характеристика).

Сравнение переходных процессов подтверждает, что небольшое уменьшение значения K_2 является эффективным способом уменьшения значения перерегулирования в системе. Вместе с тем, если САУ описывается ДУ старшего порядка, то для синтеза НР можно использовать другие методы, например метод гармонического баланса, описанный в работе [9].

Заключение

Проведенные исследования показывают, что применение математического аппарата нелинейных систем управления (в рамках данной статьи — метода фазовой плоскости) позволяет эффективно решить задачу синтеза САУ с НР. За счет кусочно-линейной аппроксимации нелинейной характеристики НР разработана общая методика построения фазового портрета, получены аналитические выражения для фазовых траекторий, на основе которых предложен алгоритм синтеза НР с учетом требований обеспечения апериодического переходного процесса, а также алгоритм расчета времени регулирования. Проведенные экспериментальные исследования на модели приводного уровня мехатронного модуля подтверждают правильность предложенного алгоритма синтеза НР. Дополнительные исследования влияния степени аппроксимации показывают, что аппроксимированная характеристика НР дает незначительное ухудшение качества управления по сравнению с исходной. Введение дополнительной постоянной времени в линейную часть объекта управления приводит к появлению пере-

регулирования, не превышающего 5 %, однако предложенные способы коррекции статической характеристики НР позволяют его устранить.

Список литературы

1. Анисимов Д. Н. Алгоритм настройки нечеткого логического регулятора на основе исследования его динамических свойств // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVI международной научно-методической конференции, Воронеж, 11–12 февраля 2016 года. 2016. С. 20–25.
2. Макаров И. М., Лохин В. М. Автоматизация синтеза и обучение интеллектуальных систем автоматического управления. М.: Наука, 2009. 227 с.
3. Eltamaly A., Farh H. Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control // Electric Power Systems Research. 2013. P. 144–150.
4. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag Heidelberg, 2001. 728 p.
5. Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Ситников М. С. Устойчивость интеллектуальных систем автоматического управления // Информационные технологии. Приложение. 2013. № 2. С. 1–32.
6. Кудинов Ю. И., Келина А. Ю. Методы синтеза и настройки нечетких ПИД регуляторов Мамдани // Информационные технологии. 2012. № 6. С. 1–32.
7. Makarov I. M., Lokhin V. M. Artificial intelligence and complex objects control // Russian Studies in Mathematics and Sciences. The Edwin Mellen Press Lewiston Queenston Lampeter, 2000. 401 p.
8. Ким Д. П. Теория автоматического управления: учебник и практикум для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2017, 276 с.
9. Kazachek N. A., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P. Stability of intelligent automatic control systems // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. 2017. N. 13. P. 547–558.
10. Dianwei Q., Jianqiang Y., Dongbin Z. Control of Overhead Crane Systems by Combining Sliding Mode with Fuzzy Regulator // IFAC Proceedings Volumes. 2011. N. 44. P. 9320–9325.
11. Sana M., M'hand O., Mustapha K., Mohamed A. Simulation and analyses of SEPIC converter using linear PID and fuzzy logic controller // Materials Today: Proceedings. 2020. N. 27. P. 3199–3208.
12. Najib El O., Saad M., Aziz D., Abdelaziz El G., Ali C., Mohammed T. Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller // Energy Reports. 2019. N. 5. P. 271–279.
13. Hituraj S., Ramakalyan A. Interval Fuzzy Type-II Controller for the Level Control of a Three Tank System // IFAC-PapersOnLine. 2016. N. 49. P. 561–566.
14. Jun Y. Stability Analysis of Nonlinear Networked Control Systems via Takagi-Sugeno Fuzzy Model // IFAC-PapersOnLine. 2017. N. 50. P. 2989–2994.
15. Jafarov S. M., Zeynalov E. R., Mustafayeva A. M. Synthesis of the Optimal Fuzzy T-S Controller for the Mobile Robot Using the Chaos Theory // Procedia Computer Science. 2016. N. 102. P. 302–308.
16. Efrain B. A., Maximiliano B. L., Fabian S. C. Fuzzy-Based Reactive Power Control for Smart PV Inverters in LV Distribution Systems // IFAC-PapersOnLine. 2017. N. 50. P. 7705–7710.

Analysis and Synthesis of a Fuzzy Controller by the Phase Plane Method

Y. A. Bykovtsev, bykovcev@mirea.ru,

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education

"MIREA — Russian Technological University", Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: **Bykovtsev Y. A.**, Graduate Student, Assistant, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA—Russian Technological University", Moscow, 119454, Russian Federation, e-mail: bykovcev@mirea.ru

Accepted on June 30, 2021

Abstract

The article is devoted to solving the problem of analysis and synthesis of a control system with a fuzzy controller by the phase plane method. The nonlinear transformation, built according to the Sugeno fuzzy model, is approximated by a piecewise linear characteristic consisting of three sections: two piecewise linear and one piecewise constant. This approach allows us to restrict ourselves to three sheets of phase trajectories, each of which is constructed on the basis of a second-order differential equation. Taking this feature into account, the technique of "stitching" of three sheets of phase trajectories is considered and an analytical base is obtained that allows one to determine the conditions for "stitching" of phase trajectories for various variants of piecewise-linear approximation of the characteristics of a fuzzy controller. In view of the specificity of the approximated model of the fuzzy controller used, useful analytical relations are given, with the help of which it is possible to calculate the time of motion of the representing point for each section with the involvement of the numerical optimization apparatus. For a variant of the approximation of three sections, a technique for synthesizing a fuzzy controller is proposed, according to which the range of parameters and the range of input signals are determined, at which an aperiodic process and a given control time are provided. On the model of the automatic control system of the drive level of the mechatronic module, it is shown that the study of a fuzzy system by such an approximated characteristic of a fuzzy controller gives quite reliable results. The conducted studies of the influence of the degree of approximation on the quality of control show that the approximated characteristic of a fuzzy controller gives a slight deterioration in quality in comparison with the smooth characteristic of a fuzzy controller. Since the capabilities of the phase plane method are limited to the 2nd order of the linear part of the automatic control system, the influence of the third order on the dynamics of the system is considered using the example of a mechatronic module drive. It is shown that taking into account the electric time constant leads to overshoot within 5–10 %. Such overshoot can be eliminated due to the proposed recommendations for correcting the static characteristic of the fuzzy controller.

Keywords: analysis, synthesis, fuzzy controller, phase plane, Sugeno fuzzy model

For citation:

Bykovtsev Y. A. Analysis and Synthesis of a Fuzzy Controller by the Phase Plane Method, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 507–517.

DOI: 10.17587/mau.22.507-517

References

1. **Anisimov D. N.** Algorithm for tuning a fuzzy logic controller based on the study of its dynamic properties, *Informatika: problema, metodologiya, tekhnologii: materialy XVI mezhdunarodnoj nauchno-metodicheskoy konferencii*, 2016, pp. 20–25 (in Russian).
2. **Makarov I. M., Lokhin V. M.** Synthesis automation and training of intelligent automatic control systems, Moscow, Nauka, 2009, 227 p. (in Russian).
3. **Eltamaly A., Farh H.** Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control, *Electric Power Systems Research*, 2013, pp. 144–150.
4. **Piegat A.** Fuzzy Modeling and Control, Physica-Verlag Heidelberg, 2001, 728 p.
5. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P., Sitnikov M. S.** Stability of intelligent automatic control systems, *Informacionnye Tekhnologii. Prilozhenie*, 2013, no. 2, pp. 1–32.
6. **Kudinov Y. I., Kelina A. Y.** Methods for the synthesis and tuning of fuzzy PID controllers Mamdani, *Informacionnye Tekhnologii. Prilozhenie*, 2012, no. 6, pp. 1–32 (in Russian).
7. **Makarov I. M., Lokhin V. M.** Artificial intelligence and complex objects control, *Russian Studies in Mathematics and Sciences*, The Edwin Mellen Press Lewiston Queenston Lampeter, 2000, 401 p.
8. **Kim D. P.** Automatic Control Theory: Textbook and Workshop for Academic Bachelor's Degree, Moscow, Urait, 2017, 276 p. (in Russian).
9. **Kazachek N. A., Lokhin V. M., Manko S. V., Romanov M. P.** Stability of intelligent automatic control systems, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2017, no. 13, pp. 547–558.
10. **Dianwei Q., Jianqiang Y., Dongbin Z.** Control of Overhead Crane Systems by Combining Sliding Mode with Fuzzy Regulator, *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, no. 44, pp. 9320–9325.
11. **Sana M., M'hand O., Mustapha K., Mohamed A.** Simulation and analyses of SEPIC converter using linear PID and fuzzy logic controller, *Materials Today: Proceedings*, 2020, no. 27, pp. 3199–3208.
12. **Najib El O., Saad M., Aziz D., Abdelaziz El G., Ali C., Mohammed T.** Improved DTC strategy of doubly fed induction motor using fuzzy logic controller, *Energy Reports*, 2019, no. 5, pp. 271–279.
13. **Hituraj S., Ramakalyan A.** Interval Fuzzy Type-II Controller for the Level Control of a Three Tank System, *IFAC-PapersOnLine*, 2016, no. 49, pp. 561–566.
14. **Jun Y.** Stability Analysis of Nonlinear Networked Control Systems via Takagi-Sugeno Fuzzy Model, *IFAC-PapersOnLine*, 2017, no. 50, pp. 2989–2994.
15. **Jafarov S. M., Zeynalov E. R., Mustafayeva A. M.** Synthesis of the Optimal Fuzzy T-S Controller for the Mobile Robot Using the Chaos Theory, *Procedia Computer Science*, 2016, no. 102, pp. 302–308.
16. **Efrain B. A., Maximiliano B. L., Fabian S. C.** Fuzzy-Based Reactive Power Control for Smart PV Inverters in LV Distribution Systems, *IFAC-PapersOnLine*, 2017, no. 50, pp. 7705–7710.

А. Б. Бушуев, канд. техн. наук, доц., bushuev@inbox.ru, **В. И. Бойков**, канд. техн. наук, доц., viboikov@mail.ru,
С. В. Быстров, канд. техн. наук, доц., sbystrov@mail.ru,
В. В. Григорьев, д-р техн. наук, проф., grigvv@yandex.ru,
 Национальный исследовательский университет ИТМО, г. Санкт-Петербург,
О. К. Мансурова, канд. техн. наук, доц.,
 Санкт-Петербургский горный университет

Синтез оптимальных информационно-энергетических схем измерительно-преобразовательных устройств

Задача синтеза информационно-энергетических схем ставится как экстремальная задача, целью которой является построение взвешенного ориентированного графа минимальной длины от входной величины до выходной величины измерительно-преобразовательного устройства. Граф имеет несколько вершин, которыми являются блоки информационно-энергетической схемы. Ребрами графа являются физические величины, связывающие входы и выходы блоков. Математически ребра задаются квадратными диагональными матрицами, содержащими размерности величин в принятой системе измерения физических величин. Вершины графа задаются передаточными матрицами, равными произведению матрицы выходного ребра на обратную матрицу входного ребра. Вес элементов графа определяется нормой матриц, зависящей от показателей степени при основных единицах системы измерений. Полученная в результате синтеза схема пригодна для использования в технической документации для объяснения физического принципа действия устройства, а также для патентной защиты.

Функция любого блока схемы по преобразованию входной величины в выходную называется физическим эффектом. Передаточная матрица является математической моделью размерностей физического эффекта. В усиленной постановке экстремальной задачи вводятся численные значения входных и выходных величин блоков, которые являются ограничениями в экстремальной задаче. В этом случае размер передаточных матриц вершин и матриц ребер расширяется на единицу. Добавленный элемент на диагонали в передаточной матрице вершины является статическим коэффициентом передачи физического эффекта, а полученная матрица является статической моделью физического эффекта. В динамической модели физического эффекта в передаточной матрице вершины вместо статического коэффициента передачи записывается передаточная функция динамического звена, которое является динамической моделью физического эффекта. В результате передаточная матрица вершины содержит информацию не только о динамических свойствах эффекта, но и о размерностях физических величин на его входе и выходе.

Ключевые слова: информационно-энергетическая схема, граф физического принципа действия, передаточная матрица физического эффекта, имитационное моделирование размерностей

Введение

На первом этапе проектирования измерительно-преобразовательных устройств (ИПУ) синтезируется структура устройства в виде функциональных, информационно-энергетических, принципиальных схем. Структурные схемы входят в техническую документацию, используемую при изготовлении и эксплуатации ИПУ, а также для защиты новых физических принципов действия (ФПД) патентами на изобретения.

Информационно-энергетические схемы (ИЭС) задают цепочки преобразования входных измеряемых физических величин в выходные величины, удобные для дальнейшего использования. Элементами цепочек или блоками схемы являются устройства, реализующие тот или иной физический эффект. Бинарные отношения между блоками определяют связи в ИПУ. Математическим аппаратом для

формализации структурных схем ИПУ служит теория графов.

Формализованное представление цепочки физических эффектов в виде направленного графа известно из трудов М. Ф. Зарипова и его школы [1]. Дальнейшее развитие этого подхода представлено в работах [2, 3]. Для математического описания любой вершины графа используется дифференциальное уравнение термодинамики $dQ = PdE$, где dQ — дифференциал обобщенной работы, P — обобщенная сила, dE — обобщенная координата. В работе [4] граф физического эффекта имеет структуру типа $A \rightarrow B \rightarrow C$, где A — вход, B — физический объект, C — результат воздействия (выход). Для автоматического поиска физического эффекта используется тезаурус для объектов A, B, C , входящий в специальный язык поиска информации (IRL). В работах [5, 6] рассмотрены алгоритмы работы этого языка и метод извлечения данных из базы физических эффектов.

Следующее направление в использовании графов физических эффектов в структурных моделях ИПУ связано с теорией размерности физических величин. В работе [7] используется система размерностей физических величин с основными единицами *MLT* (масса, длина, время). Топология технической системы представляется графом, вершинами которого являются переменные трех типов: системные переменные, входные и выходные переменные. По экспертной оценке причинно-следственных связей строятся ребра графа. Матрица графа в базе *MLT* используется для проверки достоверности структурной модели и отыскания вершин с нарушением причинно-следственных связей.

В статьях [8, 9] ребрами графа ИЭС являются квадратные 2×2 матрицы размерностей физических величин в базе *LT* (длина, время) Бартини [10], а вершинами — так называемые передаточные матрицы, задающие тип физического эффекта преобразования входной величины в выходную величину. Последовательности графов физических эффектов строятся на клетках *LT*-таблицы Бартини. Целью оптимального синтеза является суммарный граф наименьшей длины.

В настоящей статье также решается задача поиска экстремума, т. е. графа минимальной длины, задающего ФПД для ИПУ, но в базе произвольной размерности, зависящей от размерности принятой системы измерения физических величин. В частности, для Международной системы единиц измерений СИ матрицы размерностей физических величин будут иметь 7 строк и 7 столбцов,

Задача поиска экстремума рассматривается в двух постановках. Первая постановка представляет собой поиск минимума с ограничениями на существование физических эффектов, реализуемых отдельными блоками структуры. Результатом поиска является ИЭС для ИПУ. Оптимальная ИЭС представляет последовательность минимальной длины из блоков, реализующих тот или иной физический эффект, для которого известны только его название и входные и выходные физические величины. Решение такой задачи уже пригодно для защиты в патентах новой структуры ИПУ.

Во второй постановке в экстремальной задаче добавляются численные ограничения, такие как диапазоны изменения измеряемых и преобразуемых величин, статические и динамические показатели физических эффектов.

Постановка задачи

Размерность $[x]_j$ входной физической величины x_j и размерность $[y]_j$ выходной величины y_j j -го блока ИПУ, реализующего тот или иной физический эффект, заданы в виде

$$\begin{aligned} [x]_j &= [A_1^{b_{1,j}} A_2^{b_{2,j}} \dots A_i^{b_{i,j}} A_{i+1}^{b_{i+1,j}} \dots A_k^{b_{k,j}}], \\ [y]_j &= [A_1^{c_{1,j}} A_2^{c_{2,j}} \dots A_i^{c_{i,j}} A_{i+1}^{b_{i+1,j}} \dots A_k^{c_{k,j}}], \end{aligned} \quad (1)$$

где A_i — известные размерности основных физических величин в принятой для поиска системе размерностей, причем $A_i \neq 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, где k — число основных единиц системы размерностей, $j = 1, 2, \dots$, где j — номер блока, $b_{i,j}$ $c_{i,j}$ — показатели степени, вещественные числа.

Зададим входную матрицу \mathbf{X}_j и выходную матрицу \mathbf{Y}_j в виде квадратных симметричных диагональных матриц размером $k \times k$ с главными диагоналями соответственно вида

$$\begin{aligned} \text{diag} \mathbf{X}_j &= [A_1^{b_{1,j}}, A_2^{b_{2,j}}, \dots, A_i^{b_{i,j}}, A_{i+1}^{b_{i+1,j}}, \dots, A_k^{b_{k,j}}], \\ \text{diag} \mathbf{Y}_j &= [A_1^{c_{1,j}}, A_2^{c_{2,j}}, \dots, A_i^{c_{i,j}}, A_{i+1}^{b_{i+1,j}}, \dots, A_k^{c_{k,j}}], \end{aligned}$$

с остальными элементами матриц — нулевыми, т. е.

$$\mathbf{X}_j = \begin{bmatrix} A_1^{b_{1,j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{b_{k,j}} \end{bmatrix}, \mathbf{Y}_j = \begin{bmatrix} A_1^{c_{1,j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{c_{k,j}} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Введем передаточную матрицу $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$ j -го блока от входа \mathbf{X}_j к выходу \mathbf{Y}_j :

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) &= \mathbf{Y}_j(\mathbf{X}_j)^{-1} = \\ &= \begin{bmatrix} A_1^{c_{1,j}-b_{1,j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{c_{k,j}-b_{k,j}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1^{d_{1,j}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & A_k^{d_{k,j}} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\mathbf{d}_j = \{d_{1,j}, d_{2,j}, \dots, d_{i,j}, d_{i+1,j}, \dots, d_{k,j}\}$ — конечное множество показателей степеней размерностей диагональных элементов A_i матрицы $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$, $d_{i,j} = c_{i,j} - b_{i,j}$, при $d_{i,j} = 0$, $i = 1, 2, \dots, k$, получаем единичную диагональную матрицу $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) = \mathbf{E}$.

Представим цепочку из q штук последовательно соединенных блоков в виде произведения соответствующих передаточных матриц. Тогда матрицу выходной величины цепочки \mathbf{Y}_q можно записать в виде

$$\mathbf{Y}_q = \mathbf{W}_1(\mathbf{d}_1) \mathbf{W}_2(\mathbf{d}_2) \dots \mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) \mathbf{W}_{j+1}(\mathbf{d}_{j+1}) \dots \mathbf{W}_q(\mathbf{d}_q) \mathbf{X}_1,$$

где $j = 1, 2, \dots, q$.

Определим [8] ресурсоемкость $R_j(\mathbf{d}_j)$ j -го блока:

$$R_j(\mathbf{d}_j) = |\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)| = \sqrt{d_{1,j}^2 + d_{2,j}^2 + \dots + d_{k,j}^2} \quad (4)$$

и ресурсоемкость Rq всей цепочки из q штук блоков:

$$Rq = \sum_{j=1}^q R_j(\mathbf{d}_j) = \sum_{j=1}^q |\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)|. \quad (5)$$

Тогда первая постановка экстремальной задачи окончательно формулируется следующим образом.

Задано конечное множество $\mathbf{F} = \{\mathbf{W}_1(\mathbf{d}_1), \mathbf{W}_2(\mathbf{d}_2), \dots, \mathbf{W}_s(\mathbf{d}_s)\}$ передаточных матриц физических эффектов, элементами которого являются передаточные матрицы вида (3), преобразующие входную величину эффекта в выходную величину, s — число известных существующих эффектов.

Заданы матрицы входной \mathbf{X}_1 и выходной \mathbf{Y}_q величин ИПУ в виде (2). Необходимо найти каждую матрицу $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$ из произведения

$$\prod_{j=1}^q \mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) = \mathbf{Y}_q (\mathbf{X}_1)^{-1}, \quad (6)$$

которая бы принадлежала базе данных физических эффектов $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) \in \mathbf{F}$ и которая минимизировала бы общую ресурсоемкость Rq (5).

Во второй постановке задачи вводятся дополнительные к первой постановке численные ограничения, такие как заданные значения входной x_j и выходной y_j величин блоков (или диапазоны их изменения Δx_j и Δy_j). В этом случае матрицы входной и выходной величин (2) расширяются до размера $(k+1) \times (k+1)$

$$X_j = \begin{bmatrix} A_1^{b_{1,j}} & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \ddots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & A_k^{b_{k,j}} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & x_j \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$Y_j = \begin{bmatrix} A_1^{c_{1,j}} & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \ddots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & A_k^{c_{k,j}} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & y_j \end{bmatrix},$$

так что физические величины эффекта задаются в матрицах со своей размерностью. Тогда передаточная матрица (3) j -го блока записывается в виде

$$\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) = \begin{bmatrix} A_1^{b_{1,j}} & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \ddots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & A_k^{b_{k,j}} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & W_j(s) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $W_j(s) = \frac{y_j(s)}{x_j(s)}$ — скалярная заданная передаточная функция j -го блока, $j = 1, 2, \dots, q$, $s = d/dt$ — оператор дифференцирования по времени t .

Графический поиск в k -мерном пространстве физических координат

Зададим k -мерную систему координат в базисе

$$\{A_1^1, A_2^1, \dots, A_i^1, A_{i+1}^1, \dots, A_k^1\}, \quad (9)$$

где A_i^1 — орт i -й координаты A_i , которая является основной единицей в рассматриваемой системе размерностей (1). Например, для семи основных единиц системы СИ ($k = 7$) $\{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7\} = \{\text{метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, кандела, моль}\}$. В системе координат (9) введем k -мерные векторы X_j входной величины и Y_j выходной величины j -го блока ИПУ:

$$X_j = [b_{1,j}, b_{2,j}, \dots, b_{i,j}, b_{i,j+1}, \dots, b_{k,j}]^T,$$

$$Y_j = [c_{1,j}, c_{2,j}, \dots, c_{i,j}, c_{i,j+1}, \dots, c_{k,j}]^T,$$

где T — операция транспонирования, а коэффициенты $b_{i,j}$ и $c_{i,j}$ определены в соотношениях (1). Тогда вектор

$$Z_j = Y_j - X_j = [d_{1,j}, d_{2,j}, \dots, d_{i,j}, d_{i,j+1}, \dots, d_{k,j}]^T$$

в k -мерной системе координат задает вершину графа j -го физического эффекта, реализуемого в блоке ИПУ с передаточной матрицей $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) = \mathbf{Y}_j(\mathbf{X}_j)^{-1}$ (3), а координаты его образуют множество \mathbf{d}_j диагональных элементов матрицы $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$. Вектор $Z_j = \text{diag } \mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)$ назовем собственным вектором преобразования j -го физического эффекта. Он обладает минимальной длиной, определяемой величиной ресурсоемкости $R_j(\mathbf{d}_j)$ (4). Если матрица $\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j) \in \mathbf{F}$, а входная X_j и выходная Y_j величины одновременно являются соответственно входной и выходной величинами всего ИПУ, то задача поиска ФПД решена за один шаг перехода от X_j к Y_j , ИПУ состоит из одного j -го блока.

В противном случае в пространстве k -мерной системы координат необходимо искать кратчайший путь из заданной начальной точки X_1 в заданную конечную точку Y_q , т. е. находить последовательность

$$Z_j: \sum_{j=1}^q |Z_j| = \sum_{j=1}^q R_j(\mathbf{d}_j) = \min.$$

Решение этой задачи в теории графов хорошо известно [11, 12] и сводится к пошаговому поиску минимального пути из заданной вершины ориентированного взвешенного графа с неотрицательными весами ребер в заданную конечную вершину. Поиск оптимального ФПД проще вести для дуальных графов физических эффектов [13], когда входное и выходное ребра графа заменяются вершинами с входной и выходной матрицами \mathbf{X}_j и \mathbf{Y}_j соответственно, а вершина заменяется ребром, вес которого определяется модулем передаточной матрицы $|\mathbf{W}_j(\mathbf{d}_j)| = R_j(\mathbf{d}_j) \geq 0$.

Если заданы ограничения на численные значения входов и выходов графов, а также параметров передаточных функций физических эффектов, то они учитываются на каждом шаге поиска. Если ограничения не выполняются, то на очередном шаге ищется другой физический эффект, для которого ограничения выполняются.

Пример поиска в двумерной системе LT -координат

Двухмерная система кинематических величин Бартини—Кузнецова [10] имеет две основные единицы измерений — длину L и время T . LT -базис как универсальная пространственно-временная система общих законов природы используется для решения проблемы устойчивого развития в структуре природа—общество—человек [14]. В изобретательской практике LT -система применяется для имитационного моделирования ИЭС ИПУ и систем управления [15] в целях оценки избыточности [8] и асимметрии структуры [16]. Из-за наличия двух основных единиц измерений ($k = 2$) в LT -базисе задачи по построению графов можно наглядно решать на плоскости в векторном виде.

Рассмотрим пример измерения давления P , в котором выходной величиной должен быть электрический ток I . Находим передаточную матрицу преобразования

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{IP} &= \mathbf{IP}^{-1} = \begin{bmatrix} L^3 & 0 \\ 0 & T^{-3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^{-4} \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} L^{d_{1,1}} & 0 \\ 0 & T^{d_{2,1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

В системе LT -координат (рис. 1), построенной на таблице Бартини, откладываем собственный вектор преобразования по стрелке \mathbf{I} , идущей из точки "Давление" [L^2T^{-4}] в точку "Ток" [L^3T^{-3}]. Находим ресурсоемкость эффекта преобразования

$$R_1(\mathbf{d}_1) = |\mathbf{W}_{IP}| = \sqrt{1^2 + 1^2} = \sqrt{2} = 1,41,$$

где \mathbf{d}_1 — двумерный вектор, $\mathbf{d}_1 = [d_{1,1} \ d_{2,1}]^T$.

Это преобразование имеет минимальную ресурсоемкость в смысле затрат усилий проектировщика на разработку ФПД прибора, измеряющего давление. С математической точки зрения в случае нахождения дифференциального уравнения связи входной и выходной величин достаточно одного интегратора по времени и одного интегратора по пространственной координате. В базе данных физических эффектов с входом P и выходом I и передаточной матрицей \mathbf{W}_{IP} не найдено, однако обнаружен физический эффект изменения приращений электрического тока ΔI при изменении измеряемого давления P , используемый в ионизационных вакуумметрах [17] и имеющий ту же передаточную матрицу \mathbf{W}_{IP} . Вакуумметр пред-

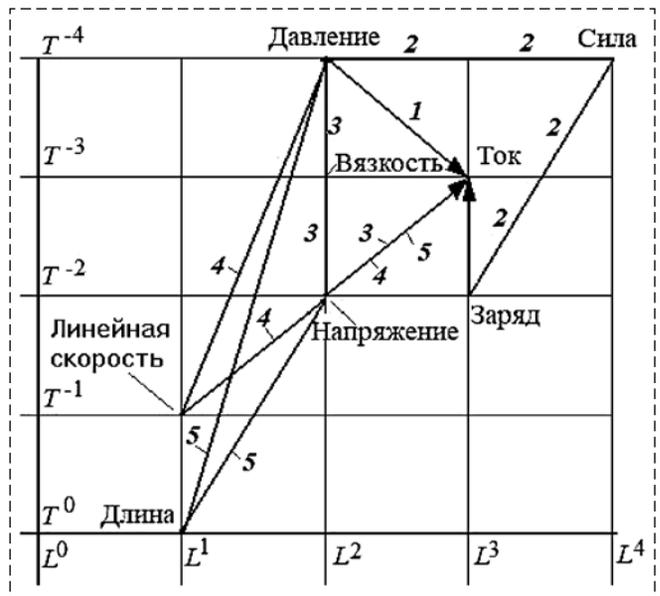


Рис. 1. Геометрический поиск эффектов на LT -плоскости
Fig. 1. Geometric search for effects on the LT -plane

ставляет собой вакуумный диод. При понижении давления газа внутри диода уменьшается число атомов, способных подвергнуться ионизации, и, соответственно, ионизационный ток, текущий между электродами при данном напряжении. Все остальные графы преобразователей давления в электрический ток будут иметь ресурсоемкость больше, чем $\sqrt{2}$.

Прямой пьезоэлектрический эффект [18] входит в граф преобразований Давление \rightarrow Сила \rightarrow Заряд \rightarrow Ток (ломаная линия 2 на рис. 1). Математически цепочка задается произведением трех передаточных матриц

$$\mathbf{W}_{IP} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 \\ 0 & T^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

с ресурсоемкостью

$$R_2(\mathbf{d}_2) = \sqrt{2^2 + (0)^2} + \sqrt{(-1)^2 + (2)^2} + \sqrt{(0)^2 + (-1)^2} = 3 + \sqrt{5} = 5,24.$$

Устройство, реализующее эту цепочку, может состоять из конуса или пирамиды, основание которой воспринимает измеряемое давление P , а вершина действует силой F на грань пьезокристалла, к двум противоположным граням которого подключается резистор для пропускания разрядного тока I .

Граф преобразований Давление \rightarrow Вязкость \rightarrow Напряжение \rightarrow Ток (ломаная линия 3 на рис. 1) включает в себя физический эффект Дорна [19]. Эффект заключается в возникновении разности потенциалов между погруженными в жидкость сетчатыми электродами, один из которых размещен у дна сосуда, а другой находится в верхней части. Частицы, взвешенные в жидкости, перемещаются в одном направлении под действием силы тяжести или, как в данном случае, под действием ультразвукового поля. Этот потенциал называется седиментационным или потенциалом оседания, он зависит от свойств частиц и свойств жидкости, в том числе и от вязкости коллоидной фазы, которая изменяется при изменении давления ультразвука. Цепочка также задается произведением трех передаточных матриц от давления P к вязкости Θ , от вязкости к разности потенциалов (электрическому напряжению) U и, далее, к току I :

$$\mathbf{W}_{IP} = \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^0 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

с ресурсоемкостью

$$R_3(\mathbf{d}_3) = \sqrt{1^2 + (0)^2} + \sqrt{(0)^2 + (1)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-1)^2} = 2 + \sqrt{2} = 3,41.$$

Магнитогидродинамический эффект [20] включен в граф преобразований 4 (рис. 1), т. е. Давление \rightarrow Линейная скорость \rightarrow Напряжение \rightarrow Ток. На этом эффекте работают МГД-генераторы. По сути, в этом эффекте проявляется закон электромагнитной индукции Фарадея — возникновение ЭДС E на концах проводника, движущегося с линейной скоростью V в магнитном поле с индукцией B поперек силовых линий магнитного поля. Замыкание проводника приводит к генерации тока I . Гидравлическая реализация устройства может представлять трубу, по которой протекает электропроводная жидкость со скоростью V под действием разности измеряемых давлений ΔP на входе и выходе трубы, где в жидкости установлены электроды для снятия наводимой ЭДС E . Труба установлена в магнитном поле с индукцией B . Матрица передачи от измеряемого давления к току также представляется в виде произведения трех передаточных матриц

$$\mathbf{W}_{IP} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

с ресурсоемкостью

$$R_4(\mathbf{d}_4) = \sqrt{(-1)^2 + (3)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-1)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-1)^2} = \sqrt{10} + 2\sqrt{2} = 5,99.$$

Наконец, рассмотрим широко применяемое при измерении давления устройство с мембраной, которая прогибается под действием давления P и перемещает шток магнитного сердечника индуктивного преобразователя на величину прогиба Z . Прогиб Z измеряется в единицах длины. Выходное напряжение U индуктивного преобразователя усиливается в электронном усилителе по току I , который является выходом датчика давления P . Более подробно конструкция датчика рассмотрена в работе [8]. Граф мембранного преобразователя Давление \rightarrow Длина \rightarrow Напряжение \rightarrow Ток обозначен на рис. 1 цифрой 5:

$$\mathbf{W}_{IP} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 \\ 0 & T^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 \\ 0 & T^1 \end{bmatrix}$$

с ресурсоемкостью

$$R_5(\mathbf{d}_5) = \sqrt{(-1)^2 + (4)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-2)^2} + \sqrt{(1)^2 + (-1)^2} = \sqrt{17} + \sqrt{5} + \sqrt{2} = 7,77.$$

Ясно, что возможны и другие цепочки реализации ФПД прибора, включающие другие физические эффекты. Однако решением экстремальной задачи является граф ФПД, имеющий наименьшую ресурсоемкость. Синтез неминимальных цепочек ФПД можно объяснить необходимостью решения изобретательской задачи [21] в целях патентования нового устройства или способа измерения.

Динамическая имитационная модель размерностей физического эффекта

Имитационное моделирование размерностей проводится в целях расчета ресурсоемкости физического эффекта, на который наложены динамические ограничения (8) в виде дифференциального уравнения, связывающего входную и выходную величины эффекта. Особенностью модели является то, что каждая компонента вектора состояний входит в модель со своей размерностью.

Для примера моделирования рассмотрим дифференциальное уравнение инерционной мембраны:

$$\tau sz(t) + z(t) = k_c p(t),$$

где $z(t)$ — динамическая функция изменения прогиба Z мембраны; $p(t)$ — заданная динамическая функция измеряемого давления P ; $s = d/dt$ — оператор дифференцирования; τ — постоянная времени; k_c — статический коэффициент преобразования; t — текущее время. Схему моделирования уравнения представляем в канонической управляемой форме (рис. 2). Схема содержит два усилителя 1 и 2, сумма-

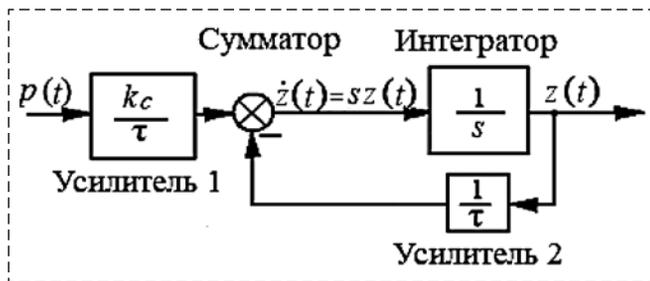


Рис. 2. Схема моделирования мембранного преобразователя давления

Fig. 2. Simulation Diagram of a diaphragm pressure transmitter

тор и интегратор. Необходимо найти их передаточные матрицы для имитационной модели размерностей.

По таблице Бартини находим размерности давления $[P] = [L^2 T^{-4}]$ и прогиба мембраны, измеряемого в единицах длины, $[Z] = [L^1 T^0]$. Записываем размерности на главных диагоналях передаточных матриц \mathbf{P} и \mathbf{Z} :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & p(t) \end{bmatrix}, \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^0 & 0 \\ 0 & 0 & z(t) \end{bmatrix},$$

в которых третьими элементами главных диагоналей являются входная $p(t)$ и выходная $z(t)$ величины эффекта соответственно. Далее находим матрицу $\dot{\mathbf{Z}}$, у которой размерность $[\dot{\mathbf{Z}}]$ по таблице Бартини равна $[L^1 T^{-1}]$, а третий элемент главной диагонали в операторной форме равен $sz(t)$:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & sz(t) \end{bmatrix}.$$

Находим передаточную матрицу интегратора \mathbf{W}_{Int} :

$$\mathbf{W}_{\text{Int}} = \mathbf{Z} \dot{\mathbf{Z}}^{-1} = \begin{bmatrix} L^0 & 0 & 0 \\ 0 & T^1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{s} \end{bmatrix}.$$

Размерности выходных величин усилителей должны быть одинаковыми и совпадать с размерностью величины $[\dot{\mathbf{Z}}] = [L^1 T^{-1}]$, так как на сумматоре Sum могут алгебраически суммироваться только физические величины одной размерности, и величина на выходе сумматора должна иметь ту же самую размерность. Запишем уравнение для выходной величины усилителя 1:

$$\mathbf{P} \mathbf{W}_{\text{G1}} = \begin{bmatrix} L^2 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-4} & 0 \\ 0 & 0 & p(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^m & 0 & 0 \\ 0 & T^n & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_c}{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{p(t)k_c}{\tau} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

где m и n — неизвестные показатели степеней при L и T в матрице \mathbf{W}_{G1} , а $\frac{k_c}{\tau}$ — статический коэффициент передачи безинерционного усилителя 1. Из условия равенства левой и правой частей уравнения (10) находим m и n , записываем матрицу

$$\mathbf{W}_{G1} = \begin{bmatrix} L^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & T^3 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_c}{\tau} \end{bmatrix}.$$

Аналогично для выходной величины усилителя 2 получаем:

$$\mathbf{Z}\mathbf{W}_{G2} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^0 & 0 \\ 0 & 0 & z(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L^r & 0 & 0 \\ 0 & T^u & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{z(t)}{\tau} \end{bmatrix},$$

откуда $r = 0$, $u = -1$. Тогда передаточная матрица \mathbf{W}_{G2} второго усилителя будет равна

$$\mathbf{W}_{G2} = \begin{bmatrix} L^0 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau} \end{bmatrix}.$$

Так как сумматор имеет два входа, то для его имитационной модели введем две передаточные матрицы \mathbf{W}_{S1} и \mathbf{W}_{S2} по первому и второму входам соответственно:

$$\mathbf{W}_{S1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{W}_{S2} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

Для проверки правильности выбора матриц \mathbf{W}_{S1} и \mathbf{W}_{S2} подставляем их в уравнение сумматора $\mathbf{P}\mathbf{W}_{G1}\mathbf{W}_{S1} - \mathbf{Z}\mathbf{W}_{G2}\mathbf{W}_{S2} = \dot{\mathbf{Z}}$, в котором выполняем сначала умножение матриц, а затем алгебраическое суммирование. Получаем тождество:

$$\begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{p(t)k_c}{\tau} - \frac{z(t)}{\tau} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} L^1 & 0 & 0 \\ 0 & T^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & sz(t) \end{bmatrix}.$$

Схема имитационной модели размерностей приведена на рис. 3.

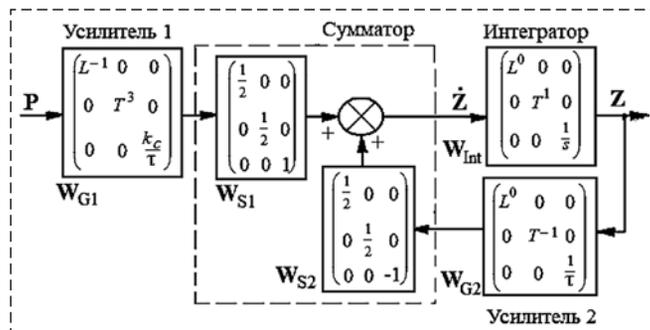


Рис. 3. Схема имитационного моделирования размерностей
Fig. 3. Simulation scheme of dimensions

Для общего случая суммирования n входов справедливо условие: если первые два элемента на главной диагонали матриц \mathbf{W}_{S1} и \mathbf{W}_{S2} будут равны $1/n$, тогда размерность выходной величины сумматора будет равна размерности входных величин.

Ресурсоемкость динамической модели мембранного преобразователя равна $\sqrt{10} + 2 = 5,16$, для статической модели $\sqrt{17} = 4,12$.

Если в качестве динамической модели преобразователя выбрать звено второго порядка, например, колебательное, то в модели размерностей появится второй интегратор и второй усилитель в обратной связи. В этом случае можно учесть численные ограничения физического эффекта на собственную частоту колебаний и коэффициент демпфирования. Ресурсоемкость для преобразователя со звеном второго порядка равна $\sqrt{5} + 4 = 6,24$.

Заключение

В статье предложен алгоритм оптимального синтеза информационно-энергетических схем измерительно-преобразовательных устройств. В результате синтеза последовательности физических эффектов, преобразующих заданную входную величину в заданную выходную величину, строится ориентированный граф, обладающий минимальным путем. Главным отличием является математическая формализация графа, вершины и ребра которого являются квадратными k -мерными матрицами размерностей физических величин, где k — число основных единиц системы физических величин, например, СИ. Благодаря этому появляется возможность количественно сравнивать структурные схемы как измерительно-преобразовательных устройств, так и систем управления, по степени ресурсоемкости. Ресурсо-

емкость структуры определяется суммой норм матриц вершин графа, либо, в силу дуальности, суммой норм матриц ребер.

Для учета динамических свойств физических эффектов в экстремальной задаче вводятся ограничения в виде дифференциальных уравнений связи входной и выходной величин физического эффекта. Ограничения вводятся в гибридную схему имитационного моделирования дифференциального уравнения вместе с размерностями переменных состояния путем расширения матриц как вершин, так и ребер графа.

Приведен пример расчета ресурсоемкости такой гибридной схемы для физического эффекта преобразования входного давления в прогиб мембраны.

Список литературы

1. Зарипов М. Ф., Петрова И. Ю. Энергоинформационный метод анализа и синтеза чувствительных элементов систем управления // Датчики и системы. 1999. № 5. С. 10—17.
2. Yakovlev A. A., Sorokin V. S., Postupaeva S. G. Modeling Physical Operating Principles During Search Design of Cooling and Refrigerating Systems // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). 2019. P. 511—520.
3. Yakovlev A. A., Sorokin V. S., Mishustina S. N., Proidakova N. V., Postupaeva S. G. A new method of search design of refrigerating systems containing a liquid and gaseous working medium based on the graph model of the physical operating principle // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 803. 2017.
4. Fomenkov S. A., Korobkin D. M., Kolesnikov S. G., Kamayev V. A., Kravets A. G. The Automated Methods of Search of Physical Effects // Journal of Soft Computing. 2015. Vol. 10, N. 3. P. 234—238.
5. Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Lobeyko V. I. Synthesis of new technical solutions with physical effects database // 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications IISA 2016. P. 7785397.
6. Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Golovanchikov A. B. Computer-aided design of the new technical systems based on the physical effects database // 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA). Larnaca, 2017. P. 1—6.
7. Coatanéab E., Ruynänen L., Caloniusb O., Mokammelb Fa., Riitahuhtab A. Systematic search and ranking of physical con-

traditions using graph theory principles: Toward a systematic analysis of design strategies and their impacts // World Conference: TRIZ FUTURE, TF 2011-2014. Procedia Engineering 131. 2015. P. 1165—1182.

8. Бушуев А. Б. Численная оценка информационно-энергетических схем измерительных устройств // Измерительная техника. 2017. № 9. С. 3—7.

9. Бушуев А. Б., Тюрин А. И. Информационно-энергетические схемы в изобретательской практике // XIV конференция Саммита разработчиков ТРИЗ "ТРИЗ в развитии" Сборник научно-исследовательских трудов. Библиотека Саммита разработчиков ТРИЗ. СПб, 2018. Вып. № 10. С. 118—134.

10. Баргини Р. О., Кузнецов П. Г. О множественности геометрий и множественности физик / Проблемы и особенности современной научной методологии. Свердловск: АН СССР, Урал. науч. центр, 1978. С. 55—65.

11. Евстигнеев В. А. Применение теории графов в программировании / Под ред. А. П. Ершова. М.: Наука, 1985. 352 с.

12. Cherkassky V. V., Goldberg A. V., Radzik T. Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation // Math. Prog. Springer-Verlag, 1996. Vol. 73, Iss. 2. P. 129—174.

13. Bushuev A. B., Kudriavtseva V. A. Simulation of the block diagrams of the information energy converters // Proc. of the Intern. Conf. on Innovative Applied Energy (IAPE'19), Oxford, UK. 2019. N. 272. P. 40.

14. Большаков Б. Е., Кузнецов О. Л. Научные основы проектирования устойчивого развития в системе природа — общество — человек. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Факультет технической кибернетики. Учебное издание. СПб., 2012. 678 с.

15. Бушуев А. Б., Петров В. А. Имитационное моделирование систем управления в *LT*-базисе // Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция "Имитационное моделирование. Теория и практика" (ИММОД-2017). Труды конференции. Секция 1. СПб, 2017. С. 88—93.

16. Бушуев А. Б., Бажин В. Ю., Литвинов Ю. В., Петров В. А., Мансурова О. К. Биологическая модель поиска решения изобретательской задачи // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 9. С. 851—859.

17. Pacey D. J. Chapter 15 — Measurement of Vacuum. Instrumentation Reference Book (Fourth Edition). Elsevier: 2010. P. 165—173.

18. Бобцов А. А., Быстров С. В., Бойков В. И., Григорьев В. В., Карев П. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. Университет ИТМО, 2017. 134 с.

19. Dukhin A. S., Goetz P. J. Characterization of liquids, nano — and micro- particulates and porous bodies using Ultrasound. Elsevier, 2017.

20. Egorov E., Agafonov V., Avdyukhina S., Borisov S. Angular Molecular—Electronic Sensor with Negative Magnetohydrodynamic Feedback // Sensors. 2018. 10 p.

21. Альтшуллер Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. Петрозаводск: Скандинавия, 2004. 208 с.

Synthesis of Optimal Information and Energy Schemes of Measuring and Converting Devices

A. B. Bushuev, bushuev@inbox.ru, V. I. Boikov, e-mail: viboikov@mail.ru,
S. V. Bystrov, sbystrov@mail.ru, V. V. Grigoriev, grigvv@yandex.ru,
ITMO National Research University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,
O. K. Mansurova, erke7@mail.ru,
Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation

Corresponding author: Bushuev A. B., Ph. D., Senior Lecturer, ITMO National Research University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: bushuev@inbox.ru

Accepted on April 21, 2021

Abstract

The synthesis of information and energy schemes is posed as an extreme problem, the purpose of which is a weighted directed graph of the minimum length from the input value to the output value of the device. The nodes of the graph are the physical effects included in the given database, and the branches are the input and output values of the effects. Nodes and branches are mathematically defined by diagonal multidimensional matrices, whose elements are determined by the dimensions of the quantities in the selected system of physical coordinates with a given number of basic units of measurement. The weight or resource intensity of the graph elements is determined by the norm of the corresponding matrices. The resulting circuit is suitable for use in technical documentation to explain the operating principle of the device, as well as for patent protection.

In the enhanced formulation of the extreme problem, restrictions are introduced on the numerical values of the input and output values of the effect and its dynamic properties in the form of the transfer function of the effect. In this case, the size of the transfer matrices of nodes and branches is expanded by one. As a result, the transfer matrix of the effect contains information not only about the dynamic properties of the effect, but also about the dimensions of the physical quantities at its input and output.

In a detailed example, the case of searching for the operating principle of a measuring-converting device of a pressure sensor with an electric current output is considered. To simplify the geometric representation of graph vectors on a plane, the problem is considered for a two-dimensional system of physical quantities with basic units of length and time. The calculation of the resource capacity is carried out according to the scheme of dimensional simulation, in which the phase variables of the differential equation enter with their physical dimensions. According to the numerical value of the resource capacity, you can compare different versions of the implementation of the operating physical principle of the device.

Keywords: information and energy schemes, graph of the physical operating principle, transfer matrix of the physical effect, simulation of dimensions

For citation:

Bushuev A. B., Boikov V. I., Bystrov S. V., Grigoriev V. V., Mansurova O. K. Synthesis of Optimal Information and Energy Schemes of Measuring and Converting Devices, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 518–526.

DOI: 10.17587/mau.22.518-526

References

1. **Zaripov M. F., Petrova I. Yu.** Energy-informational method of analysis and synthesis of sensitive elements of control systems, *Datch. Sistemy*, 1999, no. 5, pp. 10–17 (in Russian).
2. **Yakovlev A. A., Sorokin V. S., Postupaeva S. G.** Modeling Physical Operating Principles During Search Design of Cooling and Refrigerating Systems, *Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019)*, 2019, pp. 511–520.
3. **Yakovlev A. A., Sorokin V. S., Mishustina S. N., Proidakova N. V., Postupaeva S. G.** A new method of search design of refrigerating systems containing a liquid and gaseous working medium based on the graph model of the physical operating principle, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 803, 2017, 012181.
4. **Fomenkov S. A., Korobkin D. M., Kolesnikov S. G., Kamaev V. A., Kravets A. G.** The Automated Methods of Search of Physical Effects, *Journal of Soft Computing* 10(3):234–238, 2015.
5. **Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Lobeyko V. I.** Synthesis of new technical solutions with physical effects database, *7th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*, IISA 2016, pp. 7785397.
6. **Korobkin D. M., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G., Golovanchikov A. B.** Computer-aided design of the new technical systems based on the physical effects database, *8th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA)*, Larnaca, 2017, pp. 1–6.
7. **Coatanéab E., Rynänenena L., Caloniusb O., Mokammelb Fa, Riitahuhtab A.** Systematic search and ranking of physical contradictions using graph theory principles: Toward a systematic analysis of design strategies and their impacts, *World Conference: TRIZ FUTURE, TF 2011-2014*, *Procedia Engineering* 131, 2015, pp. 1165–1182.
8. **Bushuev A. B.** Numerical Estimation of the Energy Information Circuits of Measurement Devices, *Measurement Techniques*, December, 2017, vol.60, no. 9, pp. 857–862.
9. **Bushuev A. B., Turin A. I.** The Energy Information Circuits in Inventive Practice, *Development of Tools for the Solution of Innovation Problems: Coll. Sci. Studies*, Library of TRIZ Developers Summit, 2018, pp. 1–15 (in Russian).
10. **Bartini R. O., Kuznetsov P. G.** On the multiplicity of geometries and the multiplicities of physical sciences, *Problems and Features of Modern Scientific Methodology*, Ural Scientific Center of the USSR Academy of Sciences. Sverdlovsk, 1978, pp. 55–65 (in Russian).
11. **Evstigneev V. A.** Application of graph theory in programming, Edited by A. P. Yershov, Moscow, Nauka, 1985, 352 p. (in Russian).
12. **Cherkassky B. V., Goldberg A. V., Radzik T.** Shortest paths algorithms: Theory and experimental evaluation, *Math. Prog.* Springer-Verlag, 1996, vol. 73, iss. 2, pp. 129–174.
13. **Bushuev A. B., Kudriavtseva V. A.** Simulation of the block diagrams of the information energy converters, *Proc. of the Intern. Conf. on Innovative Applied Energy (IAPE'19)*, Oxford, UK, 2019, no. 272, pp. 40.
14. **Bolshakov B. E., Kuznetsov O. L.** Scientific bases of designing sustainable development in the system nature-society-man, St. Petersburg, 2012, 678 p. (in Russian).
15. **Bushuev A. B., Petrov V. A.** Simulation modeling of control systems in LT-basis, *Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference "Simulation modeling. Theory and Practice" (IMMOD-2017). Proceedings of the conference*. Section 1, St. Petersburg, 2017, pp. 88–93 (in Russian).
16. **Bushuev A. B., Bazhin V. Yu., Litvinov Yu. V., Petrov V. A., Mansurova O. K.** Biological model for finding solutions to an inventive problem, *Journal of Instrument Engineering*, 2019, vol. 62, no. 9, pp. 851–859 (in Russian).
17. **Pacey D. J.** Chapter 15 Measurement of Vacuum. Instrumentation Reference Book (Fourth Edition), Elsevier, 2010, pp. 165–173.
18. **Bobtsov A. A., Bystrov S. V., Boikov V. I., Grigoriev V. V., Karev P. V.** Executive devices and systems for microdisplacement — ITMO University, 2017, 134 p. (in Russian).
19. **Dukhin A. S., Goetz P. J.** Characterization of liquids, nano and micro-particulates and porous bodies using Ultrasound, Elsevier, 2017.
20. **Egorov E., Agafonov V., Avdyukhina S., Borisov S.** (2018). Angular Molecular—Electronic Sensor with Negative Magnetohydrodynamic Feedback, *Sensors*.
20. **Althuller G. S.** Finding Ideas. Introduction to the Theory of Inventive Problem Solving, Petrozavodsk, Skandinaviya, 2004, 208 p. (in Russian).

К. Д. Крестовников, мл. науч. сотр., k.krestovnikov@iias.spb.su,
А. А. Ерашов, мл. науч. сотр., erashov.a@iias.spb.su, А. Н. Быков, мл. науч. сотр., bykov.a@iias.spb.su,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Санкт-Петербургский
Федеральный исследовательский центр Российской академии наук" (СПб ФИЦ РАН),
Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

Масштабируемая архитектура и структура модулей распределенной системы управления процессами промышленных тепличных комплексов

С ростом населения становится актуальным вопрос продовольственного снабжения городов качественными сельскохозяйственными культурами. Возникающие при этом проблемы снабжения могут быть решены с применением промышленных тепличных комплексов с искусственным освещением и беспочвенными технологиями. Развитие этих комплексов делает актуальной задачу разработки системы управления, позволяющей автоматизировать процессы выращивания. Имеющиеся промышленные тепличные комплексы используют значительное число операций с непосредственным участием персонала, которые возможно автоматизировать: контроль микроклимата теплицы, освещение, полив и подготовка состава питательного раствора. В данной работе представлена архитектура распределенной системы управления для промышленных тепличных комплексов. Система построена по модульному принципу и разделена на три уровня. Разработанная архитектура базируется на использовании типовых модулей, что позволяет сделать систему управления гибкой и масштабируемой. В работе также приведены основные расчетные соотношения, с помощью которых можно определить необходимое число модулей для трех уровней предложенной архитектуры. Использование беспроводной передачи данных между модулями на основе технологии LoRa позволяет отказаться от прокладки информационной шины и при этом разворачивать систему на больших площадях. Контроль системы и ее параметров возможен при непосредственном взаимодействии человека с интерфейсом модуля управления или при удаленном взаимодействии через облако. В состав архитектуры входят три вида исполнительных модулей, один комбинированный сенсорный модуль и модуль управления. Каждый из исполнительных модулей функционирует по заданному алгоритму, а его параметры контролирует модуль управления исходя из заданной программы выращивания и информации с датчиков. Данная особенность позволяет повысить надежность работы системы и продолжить работу в случае потери связи с облаком, а также исключить аварийные ситуации в случае потери связи между модулями. Разработанные решения позволяют адаптировать предложенную систему управления под тепличные комплексы различной конфигурации и для разных принципов выращивания.

Ключевые слова: автоматизация, беспроводные сенсорные сети, сельское хозяйство в контролируемой среде, интернет вещей, вертикальные фермы

Введение

Рост населения и тенденции урбанизации делают актуальным вопрос продовольственного снабжения городов сельскохозяйственными культурами. Географическое расположение, сезонность и численность населения города являются основополагающими факторами, влияющими на качество сельскохозяйственной продукции, доступной жителям. Значительные трудности в снабжении свежими овощами и зеленью испытывают малые города в труднодоступных и северных районах. Логистические проблемы влияют на сроки поставки продукции из других регионов, следовательно, и на ее

качество. Решение данной проблемы возможно за счет промышленных тепличных комплексов [1], позволяющих в больших объемах выращивать продукцию в любое время года благодаря использованию комбинированного освещения и беспочвенных технологий выращивания.

В настоящее время в промышленных тепличных комплексах значительное число операций, связанных с контролем микроклимата, полива, освещения и состава питательного раствора, возложены на обслуживающий персонал. Перечисленные задачи являются однообразными и повторяющимися, при этом в значительной мере влияют на производительность и качество продукции. Внедрение автоматизи-

рованных систем управления позволит с заданной точностью контролировать параметры тепличного комплекса и снизить вмешательство человека в данные процессы, что даст возможность исключить человеческий фактор, повысить надежность и снизить издержки.

Развитие тепличных комплексов рядом с крупными городами, а также в их черте, например, размещение в городской застройке вертикальных ферм [2], позволяет решить логистические проблемы и снизить расходы на транспортировку продукции. За счет своей многоуровневой структуры и применения искусственного освещения комплексы вертикальных ферм имеют значительные посадочные площади. Вертикальные фермы могут классифицироваться в зависимости от размеров и числа уровней. Однако каждая система построена на беспочвенной передаче необходимых питательных веществ для растений. Наиболее распространенным вариантом является гидропонная система, основанная на подаче питательного раствора к корням растений. Реже встречаются аэропонные системы и аквапонные системы. Современные тенденции в методах управления тепличными комплексами рассматриваются в работе [3]. В этом исследовании представлен обзор современных теплиц, сельского хозяйства с контролируемой окружающей средой и их производных, а также освещены некоторые достижения в области экологического мониторинга, контроля и оптимизации работы. Авторы подчеркивают, что для эффективной работы вертикальных ферм необходимо контролировать значительное число параметров среды. Для решения этой задачи, а также многих других, типичных для промышленных теплиц, возможно применять распределенные системы управления, широко используемые в промышленности и робототехнике [4]. Важным свойством таких систем является масштабируемость, определяющая возможности адаптации системы к различной площади комплекса и числу контролируемых параметров. Разработка таких систем является актуальной задачей, поскольку автоматизация процессов агропромышленных комплексов позволит повысить их производительность и качество продукции [5].

Обмен информацией между модулями распределенных систем управления тепличными комплексами может быть организован с использованием проводных или беспроводных

интерфейсов. Первый способ использован в работе [6], в которой представлена автоматическая система управления теплицей. Применение данной системы позволяет добиться снижения расхода воды при поливе растений. Система с помощью различных датчиков круглосуточно контролирует параметры микроклимата теплицы, включая влажность субстрата, и, в случае отклонения какого-либо параметра, микроконтроллер управляет работой исполнительных механизмов для приведения параметров в норму. Предложенная автоматическая система орошения, сочетающая в себе капельный полив и разбрызгиватели, позволила добиться экономии воды в 48...78 % в сравнении с ручным поливом.

Передача данных с использованием проводных технологий при большом числе исполнительных устройств и датчиков ухудшает масштабируемость системы управления и повышает стоимость ее развертывания. Значительные площади тепличного комплекса делают беспроводной способ организации связи между модулями распределенной системы предпочтительным. Беспроводные технологии дают преимущества в масштабируемости и делают систему более гибкой. Данными особенностями воспользовались авторы работы [7]. В исследовании разработан протокол маршрутизации на основе беспроводной технологии ZigBee, который был добавлен в приложение для отслеживания параметров, получаемых с датчиков. Разработанная система была протестирована в реальных условиях и показала стабильную работу. Недостатком данной системы является передача информации только от теплицы к конечному пользователю, что не позволяет пользователю корректировать параметры среды теплицы. Также технология ZigBee была использована в работах [8, 9]. В статье [8] представлена система управления микроклиматом вертикальных промышленных ферм. Преимуществом данной технологии является низкая стоимость и высокая энергоэффективность. На основе результатов тестирования системы было установлено, что эффективность работы такой системы без потери пакетов информации возможна при малом объеме помех между устройствами, расположенными на малых дистанциях относительно друг друга. Результаты тестирования в исследовании [9] оказались аналогичными и показали эффективность технологии ZigBee при работе только на малых площадях.

Комбинирование беспроводных технологий Wi-Fi и ZigBee для обмена информацией рассмотрено в работе [10]. Группа устройств передает информацию на управляющие модули с помощью технологии ZigBee, а управляющие модули используют технологию Wi-Fi для передачи информации между собой и на управляющий сервер. Однако проблема стабильной работы системы только при условии малой дистанции между устройствами остается актуальной.

Иной подход к организации беспроводной связи для передачи данных между устройствами и управляющим сервером использован в работе [11], в которой авторами была выбрана технология GSM-GPRS. В представленной системе датчики собирают информацию, а затем данные отправляются пользователю через SMS или в мобильное приложение через GPRS. Однако эффективная и стабильная работа системы возможна при наличии качественного соединения со станциями сотовой сети.

Результаты исследований [12] показывают, что использование сетей, построенных в соответствии с концепцией LPWAN (Low Power Wide Area Network), позволяет повысить энергоэффективность системы и увеличить радиус возможного расположения устройств. В процессе разработки системы мониторинга параметров для вертикальных ферм [13] авторы рассматривают использование различных технологий беспроводной передачи данных, таких как Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee и LoRa. Перечисленные технологии, за исключением LoRa, имеют ряд ограничений по радиусу расположения устройств относительно друг друга. Использование модуляция LPWAN с использованием LoRa позволяет увеличить радиус расположения устройств в системе, обеспечить низкое электропотребление устройств и низкую стоимость реализации системы.

Системы, существующие на данный момент, имеют ряд недостатков, среди которых можно выделить низкую приспособленность к масштабируемости или отсутствие двусторонней связи между устройствами системы. Из рассмотренных решений лучшими возможностями к масштабированию обладают системы на основе беспроводных технологий передачи данных, применение которых с модульным принципом позволит создать гибкую систему управления тепличными комплексами. В данной работе предлагается масштабируемая архи-

тектура распределенной системы управления для автоматизации процессов функционирования промышленных тепличных комплексов, а также представлены разработанные структурные схемы модулей, входящих в ее состав.

Архитектура распределенной системы управления для промышленных вертикальных ферм

На основе проведенного анализа для формирования масштабируемой системы с возможностью реконфигурации в разрабатываемом архитектурном решении используется беспроводная передача данных по технологии "LoRa-WAN". Данная технология позволяет обеспечить энергоэффективность системы и уменьшить габаритные показатели устройств системы. Основываясь на данных, опубликованных в статьях [14, 15], можно сказать, что использование данной технологии позволяет развернуть систему в радиусе 3 км. Данная технология характеризуется низкой стоимостью радиомодулей, широким частотным диапазоном и высокой защищенностью протоколов каналов связи.

Предлагаемая архитектура системы управления, представленная на рис. 1, имеет три уровня. Передача информации между модулями различных уровней происходит по двуправленным каналам связи.

Доступ к первому уровню системы через облачный сервис [16, 17] имеет обслуживающий персонал и технологи тепличного комплекса, доступ с ограниченными правами могут иметь иные заинтересованные лица. Технологи производства имеют возможность изменения всех параметров системы и имеют доступ к статистическим данным и информации с датчиков. Сотрудники с соответствующими правами доступа могут контролировать параметры работы тепличного комплекса и участвовать в ручном управлении технологическими процессами.

Второй уровень системы представлен модулями управления. Число модулей управления рассчитывается по следующей формуле с округлением получившегося результата в большую сторону:

$$M_U = \frac{A_{T1} + A_{T2} + A_{T3} + A_{T4}}{64}, \quad (1)$$

где A_{T1} , A_{T2} , A_{T3} , A_{T4} — число модулей соответствующих типов.

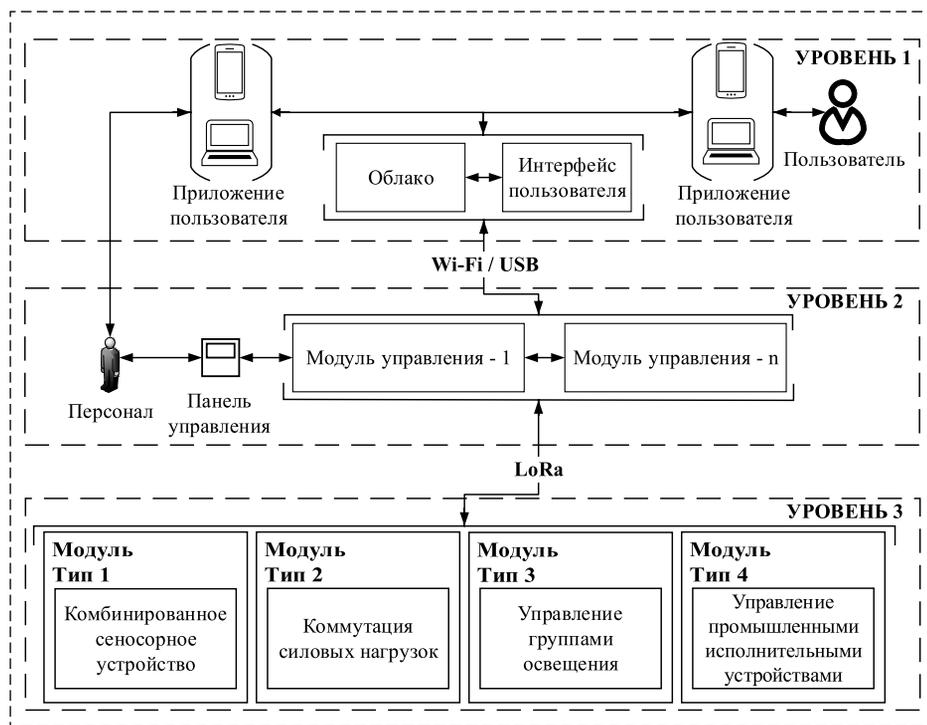


Рис. 1. Общая архитектура системы управления
Fig. 1. General architecture of the control system

Модули управления позволяют децентрализовать управление всей системой, а также изменять тип и число исполнительных модулей, адаптируя систему под особенности каждого тепличного комплекса. Максимальное число модулей, подключаемых к одному модулю управления, ограничено 64. Это обусловлено тем, что технология LoRa имеет низкую скорость передачи данных, что, в свою очередь, приводит к росту временных задержек в управлении при увеличении числа управляемых модулей. Модули управления имеют возможность автономной работы по заранее заложенной программе и корректируют работу модулей третьего уровня посредством отправки сообщений об изменении уставок или режима работы. Это позволяет повысить надежность системы и продолжить ее корректную работу при потере связи с облаком. Наличие кнопок и дисплея в разработанном модуле позволяет обслуживающему персоналу вручную управлять процессами, например, в случае необходимости оперативного вмешательства или для аварийного отключения отдельных модулей или всей системы.

Третий уровень архитектуры включает в себя модули четырех типов. Модули типа 1 используются для передачи информации о температуре, освещенности, концентрации углекислого газа и другой информации с дат-

чиков теплицы. Модули устанавливаются на тепличных стеллажах, ввиду чего возможен контакт человека с токопроводящими частями прибора. Поэтому в целях снижения рисков поражения персонала электрическим током предусмотрено питание модуля от низковольтной сети постоянного тока. Модули типа 2–4 управляют исполнительными устройствами и функционируют по заранее заданной программе, которая при необходимости корректируется модулями управления в автоматическом режиме, а также со стороны персонала через облако или панель управления.

Модули второго типа позволяют коммутировать высоковольтные нагрузки. Чис-

ло каналов коммутации и мощность подключаемой нагрузки зависит от схемотехнических решений модуля. Оптимальное число каналов коммутации выбирается исходя из особенностей применения модуля и допустимых размеров, а при необходимости коммутации большого числа нагрузок в одном месте возможно использование нескольких типовых модулей. Использование данных модулей актуально для коммутации клапанов сброса насосов высокого давления аэропонной системы, дренажных насосов и приводов канальной вентиляции.

В современных теплицах используются светодиодные лампы с управляемыми источниками питания. Такие источники питания позволяют регулировать мощность для установки необходимой яркости каждой группы освещения в соответствии с требованиями для выращивания определенного вида сельскохозяйственной продукции. Помимо обеспечения требуемых условий выращивания управление яркостью позволяет снизить электропотребление элементов освещения. Предназначение модулей третьего типа заключается в управлении драйверами светодиодных ламп освещения.

Для поддержания корректных режимов работы тепличного комплекса необходимо управлять работой насосов высокого давления, циркуляционной вентиляцией и клима-

тической установкой. Как правило, промышленные решения основаны на асинхронных трехфазных двигателях, управляемых преобразователем частоты (ПЧ). Для управления ПЧ и другими промышленными исполнительными устройствами предусмотрены модули четвертого типа, в состав которых входит несколько групп беспотенциальных контактов и выход с аналоговым сигналом в диапазоне 0...10 В с низким уровнем пульсаций.

Программы выращивания культур являются набором параметров, хранящихся в облачном сервисе. Выбор программы выращивания осуществляет технолог производства, после этого структурированный набор данных отправляется на каждый из модулей управления. Модули второго уровня не зависят между собой и могут реализовывать одновременно различающиеся между собой программы выращивания. Набор данных, получаемых модулем управления, содержит параметры режимов освещения и полива, микроклимата и иные связанные с поддержанием корректной работы. Модуль управления обрабатывает данные параметры и формирует набор функциональных уставок для исполнительных модулей, которыми он управляет. Функциональные уставки являются значениями, которые без преобразований используются модулями третьего уровня. Например, для модулей освещения они будут представлять временные интервалы, в которые лампы должны работать, и интенсивность их свечения. Низкоуровневый алгоритм работы модулей третьего уровня остается всегда неизменным, а текущие уставки действуют до получения новых, что не требует постоянно поддерживать связь с модулями управления и повышает надежность системы. Обратную связь по контролируемым параметрам модули управления получают от комбинированных сенсорных модулей. При отклонениях значений обратной связи модули управления корректируют уставки исполнительных модулей. В случае, если коррекция параметров невозможна или не изменила контролируемый параметр, модуль управления отправляет уведомление об этом в облачный сервис. Далее облачный сервис уведомляет пользователей и обслуживающий персонал о нештатной ситуации, которая требует вмешательства.

Разделение специализации модулей позволяет легко адаптировать систему в соответствии с особенностями тепличного комплекса.

Также при необходимости возможна разработка и внедрение модулей с особым функционалом, при этом не потребуется изменять архитектуру системы, методы управления и другие модули. Разработанная архитектура системы предоставляет ряд преимуществ перед уже существующими вариантами систем управления промышленными тепличными комплексами: масштабируемость, децентрализованность, значительные площади покрытия без необходимости прокладки информационных линий.

Структура электронных модулей системы

Для реализации предложенной архитектуры необходимо разработать схемотехнические решения для каждого модуля системы. Принципиальная схема каждого модуля разрабатывается в соответствии с функциональными требованиями и структурой, представленной в данном разделе работы. Структура комбинированного сенсорного модуля, предназначенного для работы в сети LoRa, представлена на рис. 2. Модуль основан на микроконтроллере STM32F103 с 32-битной архитектурой. Выбор данного микроконтроллера обусловлен его техническими характеристиками, низким энергопотреблением, доступностью и низкой стоимостью.

Комбинированный сенсорный модуль оснащен датчиком освещенности TSL256, датчиком температуры и влажности воздуха BME280 и датчиком содержания CO₂ в воздухе. Все перечисленные датчики имеют возможность работы по шине I²C. В зависимости от требований к модулю и места его установки сенсоры могут применяться в различных комбинациях. Дат-

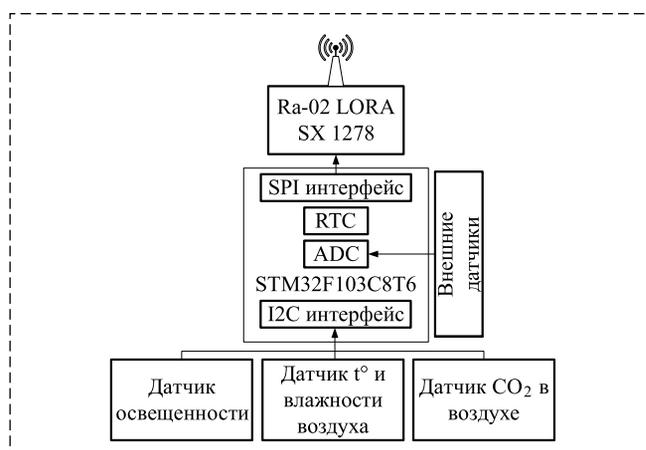


Рис. 2. Структура сенсорных модулей
Fig. 2. Sensor module structure

чики имеют компактные размеры, за счет чего возможность их установки в любой комбинации в сенсорный модуль не повлияет на его общие габаритные размеры. Также модуль имеет возможность внешнего подключения двух датчиков с аналоговым выходным сигналом. Данные по шине I²C поступают на соответствующий интерфейс микроконтроллера и преобразуются в пакет данных в соответствии со стандартом протокола LoRa-WAN. Далее по шине SPI пакет передается на модуль LORA RA-02 и отправляются на соответствующий модуль управления.

Структура модулей второго типа представлена на рис. 3. В качестве микроконтроллера для стандартизации модулей, как и в модулях первого типа, используется STM32F103.

В модулях данного типа предусмотрена работа внутренних часов реального времени, что

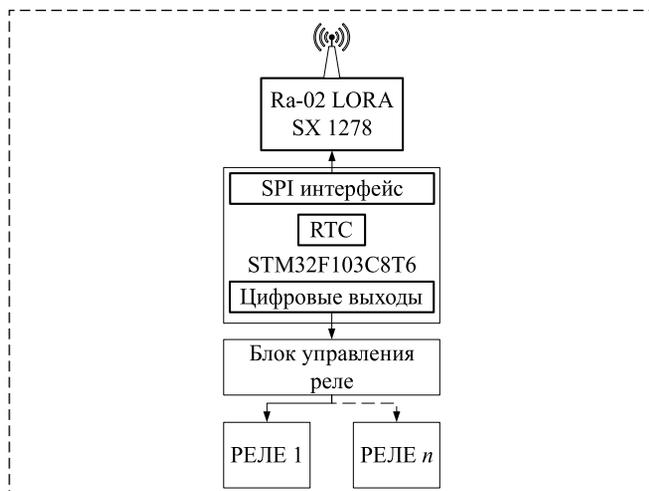


Рис. 3. Структура модуля коммутации высоковольтных нагрузок

Fig. 3. Structure of the switching module of high-voltage loads

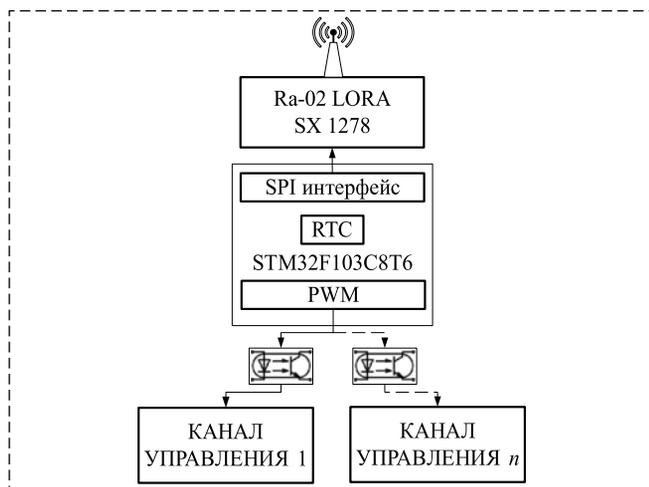


Рис. 4. Структура модуля управления драйверами светодиодных ламп

Fig. 4. Structure of the LED lamp driver control module

дает возможность задать режимы работы без синхронизации с модулем управления в течение длительного времени. Расчет необходимого числа модулей для коммутации высоковольтных нагрузок M_k выполняется в соответствии с формулой

$$M_k = \frac{N_{hl}}{n_{chk}}, \quad (2)$$

где N_{hl} — число единиц коммутируемой нагрузки; n_{chk} — число каналов коммутации каждого модуля.

Структурная схема модулей, предназначенных для коммутации слаботочных сигналов в цепях управления драйверов светодиодных ламп, представлена на рис. 4. Независимое управление различными группами освещения позволяет обеспечить необходимый уровень освещенности в зависимости от потребностей растений на различных стадиях роста.

Число необходимых модулей третьего типа в тепличном комплексе вычисляется по следующей формуле (полученный результат округляется до целого в большую сторону):

$$M_L = \frac{S_{dr}}{n_{chl} N_{dr}}, \quad (3)$$

где S_{dr} — число драйверов ламп освещения; N_{dr} — число драйверов в одной группе освещения; n_{chl} — число каналов управления модуля.

Модули четвертого типа, структурная схема которых представлена на рис. 5, предназначены для управления промышленными испол-

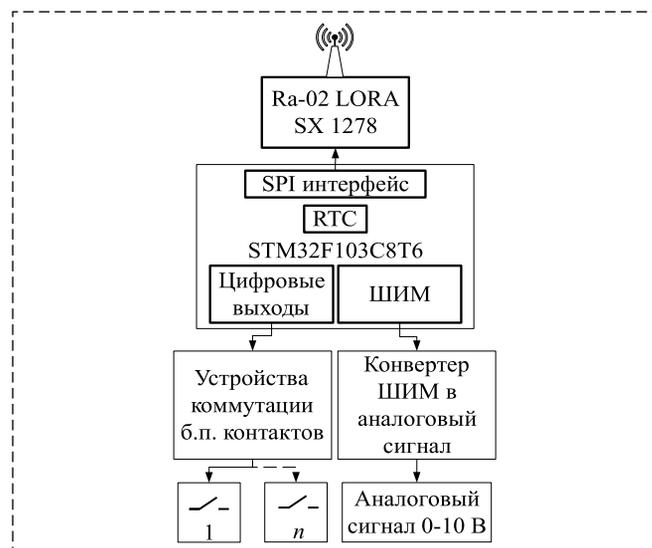


Рис. 5. Структура модуля управления исполнительными устройствами

Fig. 5. Structure of the actuator control module

нительными устройствами и преобразователями частоты асинхронных двигателей. В структуру модулей данного типа входят несколько отдельных групп беспотенциальных контактов и один выход, предназначенный для формирования аналогового сигнала в диапазоне 0...10 В.

Каждый модуль предназначен для управления одним промышленным исполнительным устройством или приводом. Число данных модулей зависит от конфигурации системы и размеров теплицы. В обязательном порядке данные модули должны применяться для управления насосами высокого давления в аэропонных теплицах, так как необходимо обеспечить им плавный пуск и различные режимы работы в ночное и дневное время.

Структура модуля управления, представленная на рис. 6, построена на базе микроконтроллера ESP32 со встроенным интерфейсом Wi-Fi.

Если в системе предусмотрен промежуточный сервер, то питание модуля и обмен информацией с облаком возможен через интерфейс USB. Дисплей модуля имеет разрешение 128 × 64, клавиатура представляет собой энкодер и кнопки.

Представленные структурные решения модулей распределенной системы управления позволяют решать весь спектр задач, связанных с автоматизацией работы промышленных тепличных комплексов. Структура модулей третьего уровня представлена в общем виде и позволяет адаптировать каждый модуль под особенности объекта, в котором планируется их эксплуатация. Число каналов управления каждого модуля выбирается исходя из конфигурации применяемого оборудования.

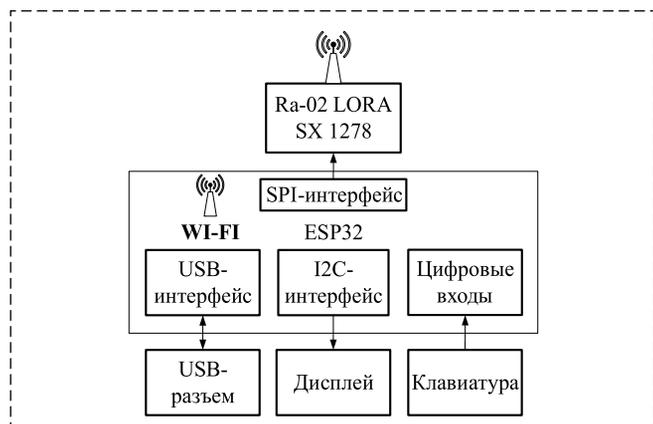


Рис. 6. Структура модуля управления группами модулей третьего уровня

Fig. 6. Structure of the module for controlling groups of third-level modules

Прикладные аспекты применения предложенных решений

В данном разделе мы рассмотрим применение разработанной архитектуры и структуры модулей для многоуровневого тепличного комплекса и проведем некоторые теоретические расчеты. На рис. 7 (см. третью сторону обложки) представлены виды внутри тепличного комплекса.

Трехуровневые стеллажи расположены в два ряда по 12 штук. Каждый уровень стеллажа имеет посадочную площадь 9 м², что требует 4 светодиодные лампы мощностью 160 Вт. Таким образом, общее число светодиодных светильников составит 288 единиц. Тепличный комплекс разделен на 3 условные зоны для выращивания различных культур одновременно. Каждая из культур требует определенный режим полива, таким образом, необходимо управлять тремя насосами с асинхронными двигателями. Каждая зона полива требует собственного дренажного насоса для возврата питательного раствора в бак.

Представленный комплекс использует естественное освещение, вследствие чего внутри могут образовываться зоны локального перегрева. Для определения данных зон на каждой полке стеллажа установлен комбинированный сенсорный модуль, а для устранения перегрева используются циркуляционные вентиляторы. Циркуляционные вентиляторы разделены на шесть групп, в каждой из которых четыре стеллажа. Комбинированный сенсорный модуль также позволяет измерять интенсивность естественного освещения, а модуль управления на основе этих данных может корректировать мощность светодиодных ламп. Климатическая установка в своем составе имеет четыре управляемые заслонки, калорифер и холодильную установку. Управление холодильной установкой и калорифером требует аналоговый сигнал в диапазоне 0...10 В. Структурная схема данного тепличного комплекса представлена на рис. 8.

Для расчета числа модулей всех типов необходимо задаться числом каналов управления модулей света и модулей коммутации высоковольтных нагрузок. Оптимальным решением для модулей света будет вариант управления одним модулем светом на одном стеллаже. Это позволит использовать промышленный электротехнический шкаф, в который будут установлены 12 драйверов светодиодных ламп и модуль управления. Таким образом, число мо-

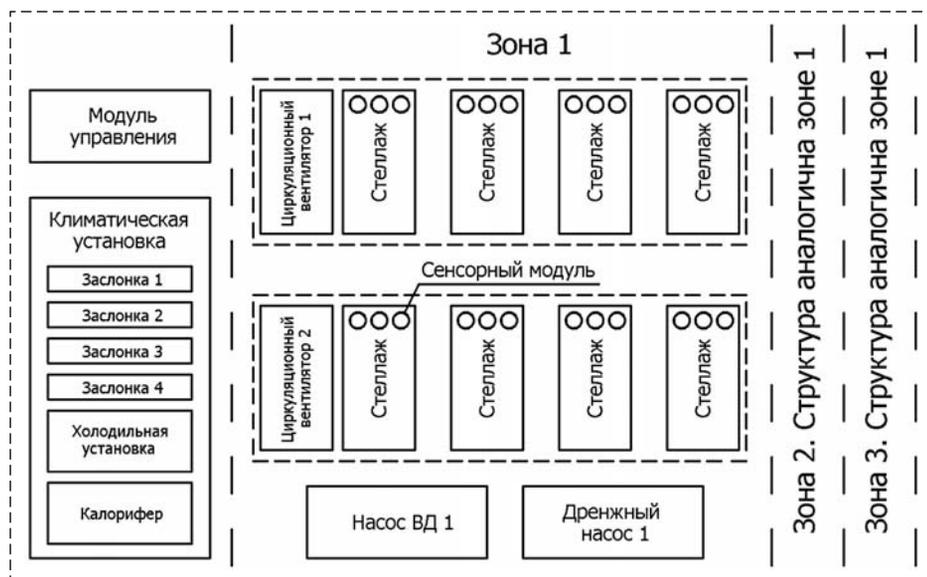


Рис. 8. Структурная схема многоуровневого тепличного комплекса
 Fig. 8. Structure scheme of a multi-level greenhouse complex

дулей управления светом $M_L = 24$. Для управления дренажными насосами, расположенными в одном месте, оптимально использовать модуль коммутации высоковольтных нагрузок с $n_{chk} = 3$. Однако такой вариант не подходит для управления заслонками климатической установки, где оптимально иметь модуль с $n_{chk} = 4$. Экономически более выгодно устанавливать два модуля, в одном из которых будет не задействован один канал коммутации. Для управления насосами, циркуляционной вентиляцией, калорифером и холодильной установкой необходимо использовать модули управления промышленными исполнительными устройствами с аналоговым выходом 0...10 В, таким образом, их общее число в системе составит 11 единиц. Число комбинированных сенсорных устройств равно числу полок стеллажей и составляет 72. Общее число модулей третьего уровня 109, поэтому в соответствии с формулой (1) для всей системы необходимо два модуля управления. Полная длина комплекса не превышает 35 м, ввиду чего дополнительных модулей исходя из масштаб комплекс не требуется. Модули предложенной системы управления требуют только подключения питания и не нуждаются в информационной шине, так как используется беспроводная передача данных. В случае применения альтернативных систем управления, модули которых используют проводные интерфейсы для обмена данными, к каждому модулю потребовалось бы проложить информационные линии. Для того чтобы развернуть систему управления,

аналогичную рассмотренной в данной статье, но с проводной передачей информации, необходима прокладка минимум 390 м информационного кабеля и установка 220 разъемов на него для подключения модулей к шине. Суммарные затраты времени на данные операции могут превысить 120 рабочих часов. Предложенная архитектура позволяет развернуть распределенную систему управления комплексом с меньшими финансовыми и временными затратами, за счет использования беспроводной передачи данных.

Закключение

В работе представлена архитектура распределенной системы управления и структура электронных модулей для управления процессами промышленных тепличных комплексов. Предлагаемая архитектура состоит из трех уровней, включающих в себя модули, предназначенные для автоматического контроля климата теплицы, режима освещения и питания растений. В работе представлены основные расчетные соотношения для определения необходимого числа модулей каждого уровня архитектуры. Применение модульного принципа позволяет реализовать децентрализованную систему управления и адаптировать ее под особенности теплицы. В зависимости от требований к сенсорам и местам их установки предложенная структура сенсорных модулей позволяет устанавливать в них только необходимые датчики и подключать внешние с аналоговым выходным сигналом. Типовая структура модулей позволяет легко расширять функциональные возможности системы за счет разработки новых специализированных решений. Повышение надежности системы достигается за счет применения принципа автономной работы каждого исполнительного модуля по некоторому базовому алгоритму, параметры которого корректируются модулями управления. Таким образом, в случае потери связи с модулем управления исполнительный модуль продолжит свою работу. Технология LoRa, заложенная в основу обмена дан-

ными в разработанной архитектуре, позволяет развернуть систему с радиусом действия до 3 км, с использованием одного модуля управления. В работе представлен пример применения предложенной архитектуры в многоуровневом тепличном комплексе с посадочной площадью 648 м². Для развертывания системы необходимо 109 модулей третьего уровня и два модуля управления второго уровня.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку алгоритмов и программного обеспечения для системы управления с предложенной архитектурой.

Список литературы

1. **Rodríguez F., Berenguel M., Guzmán J. L., Ramírez-Arias A.** Modeling and control of greenhouse crop growth. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 250 p. DOI: 10.1007/978-3-319-11134-6.
2. **Birkby J.** Vertical farming. ATTRA Sustainable Agriculture. National Centre for Appropriate Technology, 2016.
3. **Shamshiri R., Kalantari F., Ting K. C., Thorp K. R., Hameed I. A., Weltzien C., Shad Z. M.** Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. 2018. DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210C.
4. **Андреев В. П., Плетенев П. Ф.** Метод информационного взаимодействия для систем распределенного управления в роботах с модульной архитектурой // Труды СПИИРАН. 2018. Т. 57, № 2. С. 134–160. DOI: 10.15622/sp.57.6.
5. **D'Autilia R., D'Ambrosi I.** Is there enough fertile soil to feed a planet of growing cities? // Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications. 2015. N. 419. P. 668–674. DOI: 10.1016/j.physa.2014.10.048.
6. **Sivagami A., Hareeshvare U., Maheshwar S., Venkatachalapathy V. S. K.** Automated irrigation system for greenhouse monitoring // Journal of The Institution of Engineers (India): Series A. 2018. Vol. 99, N. 2. P. 183–191. DOI: 10.1007/s40030-018-0264-0.
7. **Akkaş M. A., Sokullu R.** An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes // Procedia computer science. 2017. N. 113. P. 603–608. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.300.
8. **Chen F., Qin L., Li X., Wu G., Shi C.** Design and implementation of ZigBee wireless sensor and control network

system in greenhouse // 2017 36th Chinese Control Conference (CCC) IEEE. 2017, July. P. 8982–8986. DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8028786.

9. **Li Z., Wang J., Higgs R., Zhou L., Yuan W.** Design of an intelligent management system for agricultural greenhouses based on the internet of things // 2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC). 2017, July. Vol. 2. P. 154–160. DOI: 10.1109/CSE-EUC.2017.212.

10. **Xiao J., Li J. T.** Design and implementation of intelligent temperature and humidity monitoring system based on ZigBee and WiFi // Procedia Computer Science. 2020. N. 166. P. 419–422. DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.072.

11. **Ullah M. W., Mortuza M. G., Kabir M. H., Ahmed Z. U., Supta S. K. D., Das P., Hossain S. M. D.** Internet of Things Based Smart Greenhouse: Remote Monitoring and Automatic Control // DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences. 2018. DOI: 10.12783/dteees/iceee2018/27803.

12. **Pop A. I., Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M.** Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks? In GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference. 2017, December. P. 1–6. IEEE. DOI: 10.1109/GLOCOM.2017.8254509.

13. **Wu J., Tang X., Lei J.** Design of wireless monitoring system for greenhouse based on LoRa. In Journal of Physics: Conference Series. 2020, October. Vol. 1650, N. 2. P. 022075. IOP Publishing. DOI: 10.1088/1742-6596/1650/2/022075.

14. **Petajajarvi J., Mikhaylov K., Roivainen A., Hanninen T., Pettissalo M.** On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In 2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST). 2015, December. P. 55–59. IEEE. DOI: 10.1109/ITST.2015.7377400.

15. **Denisov A., Shabanova A., Sivchenko O.** Data Exchange Method for Wireless UAV-Aided Communication in Sensor Systems and Robotic Devices. In International Conference on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2020, October. P. 45–54. DOI: 10.1007/978-3-030-60337-3_5.

16. **Давыдов Д. С., Кашевник А. М., Косицын Д. П., Шабаев А. И., Шабалина И. М.** Разработка платформы планирования производства с использованием технологий "облачных вычислений" // Тр. СПИИРАН. 2012. Т. 23. С. 416–430. DOI: 10.15622/sp.23.23.

17. **Левоневский Д. К., Ватаманюк И. В., Савельев А. И.** Многомодальная информационно-навигационная облачная система МИНОС для корпоративного киберфизического интеллектуального пространства // Программная инженерия. 2017. Т. 8, № 3. С. 120–128.

Scalable Architecture and Structure of Modules for Distributed Process Control System in Industrial Greenhouse Complexes

K. D. Krestovnikov, k.krestovnikov@iias.spb.su, **A. A. Erashov**, erashov.a@iias.spb.su,

A. N. Bykov, bykov.a@iias.spb.su,

St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS),
St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 199178, Russian Federation

Corresponding author: **Krestovnikov Konstantin D.**, Junior Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS), St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Accepted on July 05, 2021

Abstract

With the growth of the population, the issue of food supply of cities with high-quality agricultural crops becomes urgent. Supply problems arising from this can be solved with the use of industrial greenhouse complexes with artificial lighting and groundless technologies. The development of these complexes makes the task of developing a control system to automate the cultivation processes urgent. Real industrial greenhouse complexes have a significant number of operations with the direct participation of personnel, which can be automated: control of the greenhouse microclimate, lighting, watering and preparation of the nutrient solution composition. This paper presents the architecture of a distributed control system for industrial greenhouse complexes. The system is built on a modular basis and is divided into three levels. The developed architecture is based on the use of standard modules, which makes the control system flexible and scalable. The paper also presents the basic design ratios, with the help of which it is possible to determine the required number of modules for the three levels of the proposed architecture. The use of wireless data transmission between modules based on LoRa technology allows you to abandon the laying of an information bus and at the same time deploy the system over large areas. Control of the system and its parameters is possible through direct human interaction with the interface of the control module or through remote interaction through the cloud. The architecture includes 3 types of executive modules, one combined sensor module and a control module. Each of the executive modules functions according to a given algorithm, and its parameters are controlled by a control module, based on a given growing program and information from sensors. This feature allows you to increase the reliability of the system and continue working in the event of a loss of communication with the cloud, as well as to exclude emergencies in the event of a loss of communication between the modules. The developed solutions make it possible to adapt the proposed control system for greenhouse complexes of various configurations and growing principles.

Keywords: automation, wireless sensor networks, agriculture in a controlled environment, internet of things, vertical farms

For citation:

Krestovnikov K. D., Erashov A. A., Bykov A. N. Scalable Architecture and Structure of Modules for Distributed Process Control System in Industrial Greenhouse Complexes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 527–536.

DOI: 10.17587/mau.22.527-536

References

1. Rodríguez F., Berenguel M., Guzmán J. L., Ramírez-Arias A. Modeling and control of greenhouse crop growth, Switzerland, Springer International Publishing, 2015, 250 p. DOI: 10.1007/978-3-319-11134-6.
2. Birkby J. Vertical farming. ATTRA Sustainable Agriculture, National Centre for Appropriate Technology, 2016.
3. Shamshiri R., Kalantari F., Ting K. C., Thorp K. R., Hameed I. A., Weltzien C., Shad Z. M. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture, 2018, DOI: 10.25165/j.ijabe.20181101.3210C.
4. Andreev V. P., Pletenev P. F. Method of Information Interaction for Distributed Control Systems of Robots with Modular Architecture, *SPIIRAS Proceedings*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 134–160 (in Russian), DOI: 10.15622/sp.57.6.
5. D'Autilia R., D'Ambrosi I. Is there enough fertile soil to feed a planet of growing cities? *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, vol. 419, pp. 668–674, DOI: 10.1016/j.physa.2014.10.048.
6. Sivagami A., Hareeshvare U., Maheshwar S., Venkatachalapathy V. S. K. Automated irrigation system for greenhouse monitoring, *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 2018, vol. 99, no. 2, pp. 183–191, DOI: 10.1007/s40030-018-0264-0.
7. Akkaş M. A., Sokullu R. An IoT-based greenhouse monitoring system with Micaz motes, *Procedia Computer Science*, 2017, vol. 113, pp. 603–608, DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.300.
8. Chen F., Qin L., Li X., Wu G., Shi C. (2017, July). Design and implementation of ZigBee wireless sensor and control network system in greenhouse, *2017 36th Chinese Control Conference (CCC)*, 2017, pp. 8982–8986, DOI: 10.23919/ChiCC.2017.8028786.
9. Li Z., Wang J., Higgs R., Zhou L., Yuan W. Design of an intelligent management system for agricultural greenhouses based on the internet of things, *2017 IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, 2017, July, vol. 2, pp. 154–160, DOI: 10.1109/CSE-EUC.2017.212.
10. Xiao J., Li J. T. Design and implementation of intelligent temperature and humidity monitoring system based on ZigBee and WiFi, *Procedia Computer Science*, 2020, vol.166, pp. 419–422, DOI: 10.1016/j.procs.2020.02.072.
11. Ullah M. W., Mortuza M. G., Kabir M. H., Ahmed Z. U., Supta S. K. D., Das P., Hossain S. M. D. Internet of Things Based Smart Greenhouse: Remote Monitoring and Automatic Control, *DEStech Transactions on Environment, Energy and Earth Sciences*, 2018, DOI: 10.12783/dteees/iceee2018/27803.
12. Pop A. I., Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M. Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks? *GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference*, 2017, December, pp. 1–6, DOI: 10.1109/GLOCOM.2017.8254509.
13. Wu J., Tang X., Lei J. Design of wireless monitoring system for greenhouse based on LoRa, *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, October, vol. 1650, no. 2, p. 022075, IOP Publishing, DOI: 10.1088/1742-6596/1650/2/022075.
14. Petajajarvi J., Mikhaylov K., Roivainen A., Hanninen T., Pettissalo M. On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology, *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2015, December, pp. 55–59, DOI: 10.1109/ITST.2015.7377400.
15. Denisov A., Shabanova A., Sivchenko O. Data Exchange Method for Wireless UAV-Aided Communication in Sensor Systems and Robotic Devices, *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*, 2020, October, pp. 45–54, Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-60337-3_5.
16. Davydov D. S., Kashevnik A. M., Kosicin D. P., Sha-baev A. I., Shabalina I. M. Development of the Platform for Production Planning Using Cloud Computing Technology, *SPIIRAS Proceedings*, 2012, vol. 23, no.4, pp. 416–430 (in Russian), DOI: 10.15622/sp.23.23.
17. Levonevskiy D. K., Vatamaniuk I. V., Saveliev A. I. MINOS Multimodal Information and Navigation Cloud System for the Corporate Cyber-Physical Smart Space, *Programmnaya Ingeneria*, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 120–128 (in Russian).

И. П. Карпова, канд. техн. наук, доц., karпова_ip@mail.ru,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", Москва

Организация маршрута анимата на основе визуальных ориентиров и распознавания сцен

*Среди природоподобных технологий есть направление, в рамках которого исследуется применение навигационных механизмов насекомых для навигации автономных роботов. Данная работа относится к указанному направлению и посвящена использованию этого подхода для решения задач фуражирования и рекогносцировки. В качестве модельного вида взят муравей рода *Formica rufa* — рыжий лесной муравей, который активно использует коллективную фуражировку. Муравей-разведчик этого вида не только запоминает маршрут до пищи, но умеет передавать муравьям-фуражирам сведения о местонахождении пищи, и те самостоятельно, без сопровождающего, могут до нее дойти и вернуться домой. Рассматриваются основные аспекты навигационного механизма муравьев, которые используют для возвращения домой и повторного прохождения пути запомненные ранее визуальные ориентиры и врожденную систему интеграции пути. В основу предлагаемого метода положено запоминание пути по визуальным ориентирам и принципы нечеткого управления. Введена модель описания пути для анимата, состоящая из последовательности сцен. Создан алгоритм, имитирующий поисковое поведение муравья для анимата-разведчика. Разработан набор правил, которые позволяют анимату-последователю перейти от описания маршрута к действиям по его воспроизведению. В основе поведения последователя (фуражира) лежат те же принципы, что и у разведчика, только вместо запоминания сцен он использует процедуру распознавания и сопоставления сцен. Действия аниматов представлены в виде элементарных поведенческих процедур, каждая поведенческая процедура реализована с помощью конечного автомата. Приведены результаты имитационного моделирования для решения задачи фуражировки. Эксперименты проводились с помощью системы моделирования, основанной на фреймворке ROS. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и достаточно высокую эффективность предложенного метода. Метод не требует от робота больших вычислительных мощностей и развитых сенсорных возможностей и может также применяться в задачах рекогносцировки и патрулирования.*

Ключевые слова: автономный мобильный робот, нечеткое управление, навигация муравьев, распознавание сцен, пространственно-временная ориентация, задачи фуражировки и рекогносцировки

Введение

В большинстве работ, посвященных применению навигационных механизмов насекомых в робототехнике, в качестве модельного вида используются пустынные муравьи. Возможно, это обусловлено тем, что их навигация изучена более подробно, чем для других видов. Можно считать установленным, что муравьи не строят карту местности [1], а для определения направления движения в основном используют солнечный свет (поляризацию освещенного неба) и визуальные ориентиры [2]. Отдельные виды муравьев используют также феромоновый след [3], но в данной работе эта возможность не рассматривается, так как требует специально оборудованного полигона.

Пустынные муравьи относятся к видам с одиночной фуражировкой. Нас же интересует не только поиск "еды" (или ресурсов в общем смысле) и возвращение особи домой (в гнездо),

но и возможность передачи сведений о маршруте от одной особи к другой — пассивному фуражиру. Пассивный фуражир не занимается поиском еды, но может быть мобилизован для переноса еды активным фуражиром — разведчиком. Единственным видом, у которого к настоящему времени обнаружен такой вариант фуражировки, является *Formica rufa* — рыжий лесной муравей [4]. Муравьи-разведчики этого вида периодически отправляются на поиски еды (их гонит голод). Найдя еду и вернувшись в гнездо, они могут повести пассивных фуражиров за собой к еде. Но возможен также и другой вариант, когда разведчик передает фуражиру сведения о маршруте до еды, и тот самостоятельно идет за ней. Это было исследовано и во время натуральных наблюдений [5], и в лабораторных опытах [6].

Очевидно, что для реализации подобного подхода предлагаемый метод должен позволять описывать маршрут в очень краткой форме.

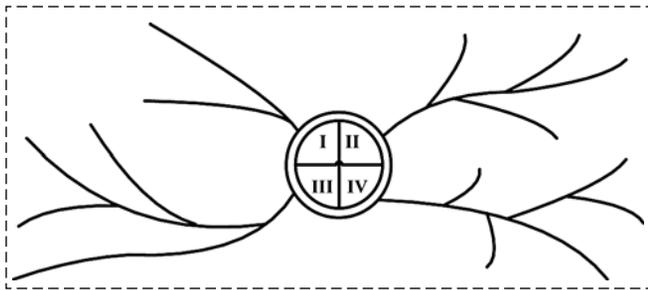


Рис. 1. Гнездо с четырьмя колоннами и дорогами
Fig. 1. The nest with 4 columns and ways

В экспериментальных исследованиях [6, 7] было показано, что чем сложнее маршрут, тем больше времени требуется на его передачу от разведчика фуражиру и тем меньше вероятность успешного прохождения маршрута фуражиром. Маршрут в этих опытах задавался последовательностью поворотов в лабиринте. Последнее допущение не является абсолютно искусственным, так как в природе рыжие лесные муравьи перемещаются по так называемым *дорогам* (рис. 1) — протоптанным муравьями тропам с ветвистой структурой, и их маршрут может быть представлен как последовательность поворотов.

Конечно, имитируя природоподобные механизмы на робототехнических устройствах, мы могли бы отказаться от жестких ограничений по объему памяти и скорости передачи данных. Но чем дальше мы будем отходить от первоисточника, тем меньше у нас будет прав ссылаться на работы биологов и относить наш подход к природоподобным технологиям. Более того, в этом исследовании во время имитационного моделирования выяснилось, что исключение некоторых элементов механизма ориентации муравьев или применение более простых технических решений приводят к неустойчивой работе метода. И только в случае реализации, максимально близкой к тому, что наблюдается у муравьев, метод работает устойчиво даже в сложных условиях — при малом или, наоборот, очень большом числе ориентиров.

Опишем основные аспекты наблюдаемого поведения муравьев:

1. При перемещении на местности муравьи используют компас, включающий Солнце (точнее, поляризацию освещенного неба), шагомер и систему интеграции пути (СИП, path integration) [1, 8]. Это означает, что во время движения они постоянно обновляют свой вектор, который указывает фактическое направление обратно на муравейник (гнездо).

2. И компас, и шагомер подвержены кумулятивным ошибкам, поэтому для навигации муравьи также используют визуальные ориентиры (камни, отдельные растения и другие ориентиры, которые выделяются на местности). Более того, для опытных фуражиров информация, предоставляемая визуальными ориентирами, доминирует над информацией от системы интеграции пути в случае их конфликта [9, 10].

3. Муравьи ведут себя так, как если бы они делали двумерные виды ("снимки") сцен с ориентирами, видимыми с определенных точек обзора, сохраняли эти виды, а затем при повторном приближении к ориентиру сравнивали сохраненные снимки с текущими [11]. Судя по поведению муравья при запоминании сцены, он осматривает составляющие ее ориентиры, выбирает один (опорный), а затем обходит его справа или слева. Это предположение подтверждается тем, что при повторном прохождении этого маршрута муравей стремится обойти знакомый ориентир с той же стороны, даже если ориентир переместили левее или правее начального положения [12].

5. Вероятно, муравьи различают два типа ориентиров, которые можно назвать *локальными* и *путевыми*. Первые расположены вблизи гнезда и около постоянных кормовых участков, вторые — на пути к кормовому участку или обратно. Обнаружение путевого ориентира заставляет муравья поворачивать под нужным углом и продолжать движение. Также распознавание ориентира подавляет влияние локального вектора движения, заданного предыдущим ориентиром [1]. Обнаружение локального ориентира запускает процедуру систематического поиска: муравей знает, что гнездо (или еда) находятся рядом, и начинает методично кружить вокруг этого места, пока не найдет искомое.

6. При обнаружении во время прохождения маршрута искомого объекта ("еды") пассивный фуражир прекращает движение по маршруту и идет в сторону еды, чтобы взять ее и перенести в гнездо. Таким образом, маршрут может оказаться пройденным не до конца.

7. Правила, по которым муравей из множества ориентиров выбирает "опорный", в литературе не описаны. Но у рыжих лесных муравьев все поисковые участки около гнезда распределены между колоннами (кланами) этого гнезда (рис. 1, [13]), и муравей-разведчик в процессе поиска старается оставаться в пределах "своего" сектора, т. е. придерживается не-

коего общего направления поиска. Кроме того, резкие повороты в пути чаще приводят к неудачному поиску, что показано как для пустынных муравьев [14], так и для лесных [4]. Поэтому мы будем считать, что муравей выбирает ориентиры, расположенные прямо перед ним, а если их нет, выбирает ориентиры правее или левее. В отсутствие ориентиров он идет прямо. Очевидно, что правило выбора ориентира для конкретной технической системы можно поменять и выбирать, например, поочередно левый и правый объекты. Главное, чтобы последователь следовал бы тем же правилам и совершал аналогичные разведчику действия при поиске потерянного ориентира.

Многие исследователи в области автономных мобильных роботов (АМР) используют принципы навигации муравьев в качестве основы при разработке методов навигации и ориентации АМР. Например, в работе [1] предлагается модель памяти на основе искусственной нейронной сети, использующая СИП и визуальные ориентиры. Имитационное моделирование подтверждает, что подобная система позволяет искусственному агенту хорошо ориентироваться, и это поведение можно объяснить без предположения о существовании когнитивной карты как общего представления о кормовом пространстве.

Нас же интересуют в первую очередь те работы, в которых навигационный механизм муравьев используется для организации перемещения автономных роботов. Одной из первых в этой области можно считать работу [15]. Там авторы описывают робота, оснащенного компасом и СИП с использованием данных энкодеров. Специальный компас позволял роботу ориентироваться по поляризации солнечного света аналогично муравью, и робот мог вернуться в точку отправления после прохождения маршрута, состоящего из нескольких отрезков. Вообще задача произвольного перемещения по полигону с возможностью возвращения домой (homing) разработана достаточно подробно [16, 17]. Уделяется большое внимание и решению задачи организации памяти (представлению маршрута в памяти). Например, в работе [18] предложен механизм хранения маршрута в виде дерева, позволяющий не учитывать метрические размеры отрезков, а только топологию расположения ориентиров.

Способ представления маршрута в памяти робота и правила его интерпретации для

повторного прохождения по маршруту также описаны в работе [19]. К достоинствам предложенного там механизма можно отнести вычислительную простоту, к недостаткам — использование цвета ориентира как его идентификатора и необходимость из любой точки полигона видеть хотя бы один ориентир. Вследствие этого полигон должен быть оснащен ориентирами разных цветов, а робот должен уметь их все различать. Это само по себе является технически достаточно сложной задачей и требует использования высокоточных сенсоров, что ограничивает применение этого метода.

Цель данной работы — создать такой механизм запоминания и интерпретации описания маршрута, который позволит роботу ориентироваться на реальном полигоне в рамках решения задач фуражировки, рекогносцировки и т. д. Механизм должен быть вычислительно простым, описание маршрута должно занимать как можно меньше памяти, чтобы роботы могли обмениваться им между собою по низкоскоростным каналам связи. Он не должен требовать однозначной идентификации объектов (ориентиров) и должен работать в условиях, когда на полигоне есть точки, из которых ориентиры не видны.

Далее речь пойдет не о роботах, а об аниматах, так как объектом исследования является искусственный автономный агент, действующий в виртуальной или реальной среде и имитирующий поведение живого организма [20].

Постановка задачи ориентации

Данная задача разбивается на три этапа: найти искомый объект, вернуться "домой" (в точку отправления) и при необходимости повторить этот путь. В процессе поиска пищи у муравьев рода *Формика* [5] разведчик запоминает свое положение относительно солнца, визуальные ориентиры, мимо которых он проходит, и примерное расстояние до них. Это позволяет ему вернуться обратно в гнездо и передавать фуражирам сведения о маршруте так, чтобы они могли дойти до этой пищи [21]. При этом нет необходимости повторять маршрут с высокой точностью, и описание маршрута определяет визуальный коридор, а не узкую дорогу [22].

Исходя из этого на полигоне, по которому перемещаются аниматы, расположен "дом", неподвижные объекты (ориентиры) и некото-

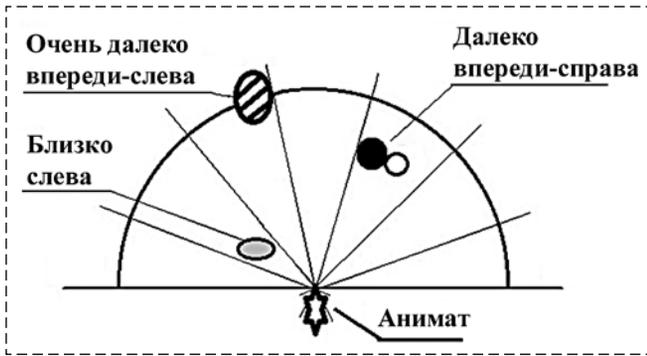


Рис. 2. Область видимости анимата, направление и расстояние
Fig. 2. Animat's field of view, direction and distance

Таблица 1
Table 1

Шкала расстояний
The distance scale

Расстояние (усл. ед.)	Лингвистическая переменная	Обозначение
0...2	Очень близко	NEAR
3...5	Близко	CLOSE
6...10	Недалеко	NOTCLOSE
11...15	Далеко	FAR
16...20	Очень далеко	VERYFAR

рые целевые объекты ("пища", которую нужно перенести в "дом"). Путь — это последовательность перемещений, приводящая анимата от одного целевого объекта к другому, при этом в качестве целевых объектов могут выступать "дом" или "пища". Изначально аниматы находятся около "дома".

Анимат может двигаться вперед и назад, поворачивать направо и налево, останавливаться. У него есть локатор, с помощью которого он "видит" окружающие объекты (внутри области видимости, например, в 120° или 180°), распознает их цвет, размер и умеет определять расстояние до них (приблизительно) и направление (относительно себя) (рис. 2). В связи с этим естественным является подход, основанный на нечетком управлении.

Для работы с нечеткими понятиями "расстояние" и "направление" были введены соответствующие лингвистические переменные. Табл. 1 содержит шкалу пересчета расстояний для радиуса видимости 20 условных единиц ("клеток"), табл. 2 — шкалу пересчета направлений для области видимости в 120° (рис. 3). Естественно, конкретные диапазоны значений этих шкал могут быть заменены другими при необходимости, единственная неизменная величина — это число переменных (5).

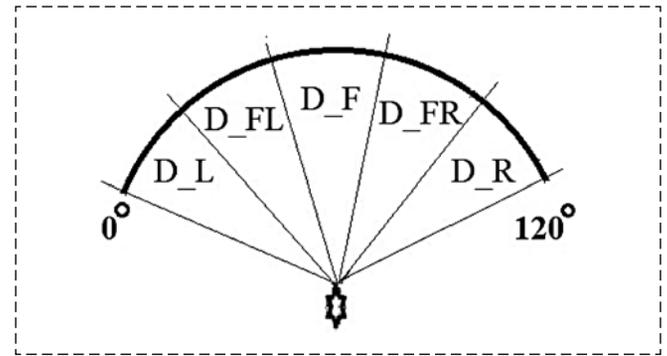


Рис. 3. Диапазоны направлений для области видимости 120°
Fig. 3. Direction ranges for the field of view in 120°

Таблица 2
Table 2

Шкала направлений
The direction scale

Значение, °	Лингвистическая переменная	Обозначение
0...23	Слева	D_L
24...47	Впереди слева	D_FL
48...71	Впереди	D_F
72...95	Впереди справа	D_FR
96...119	Справа	D_R

Под *ориентиром* будем понимать один или несколько объектов, образующих компактную группу, т. е. расположенных близко друг к другу. Ориентир Q образуется объектами $\{x_n\}$, для которых:

$$Q = \{x_n\}: \exists i: |p_{x_i} - p_{x_{i+1}}| \leq \Delta, i \in [1, n-1], \quad (1)$$

где p_{x_i} и p_{x_j} — ближайшие друг к другу точки соседних объектов x_i и x_{i+1} , а Δ — верхняя граница значения лингвистической переменной "очень близко".

Описание метода

Основной принцип формирования описания пути основывается на том, что муравей-разведчик запоминает путь приблизительно, и муравей-фуражир повторяет этот путь в общих чертах. Поэтому при формировании описания маршрута запоминаются сцены и ориентиры, которые анимат выбирает в качестве опорных, а также число тактов, которые ему требуются для того, чтобы обойти этот ориентир и выбрать следующий. Таким образом, в модель вводится понятие времени, которое привязано не столько к тактам (шагам анимата), сколько к изменению его состояния относительно

окружающей среды (завершение одного отрезка пути и переход к следующему). Это согласуется, в частности, с идеями, изложенными в работе [23], что подсчет заметных визуальных изменений является основным механизмом восприятия времени.

Анимату необходимо уметь отличать ориентиры друг от друга. Наличие ориентиров с одинаковым набором цветов делает невозможным использование цвета для их идентификации. Поэтому, естественно, необходимо решать более общую задачу по распознаванию сцены [24, 25]. Сцена образуется набором видимых ориентиров и отношений между ними. Идентификацию будем рассматривать не как задачу присвоения имен объектам (ориентирам), а как соотнесение наблюдаемых ориентиров с ориентирами, определенными во время предыдущего прохождения этим путем или на предыдущем ракурсе наблюдения [25]. При этом возникают проблемы с распознаванием ориентиров и сцен. Например, могут быть видны не все объекты, входящие в ориентир, при изменении ракурса одни объекты могут перекрывать другие и т. д.

Маршрут описывается как последовательность сцен $S = \{s_j\}$, $j = 1, \dots, L$, где L — длина маршрута. Каждая сцена состоит из множества ориентиров $V = \{v_{ij}\}$, один из которых находится в фокусе внимания и является *опорным* (относительно него совершаются все действия). Каждый ориентир, в свою очередь, состоит из множества объектов p :

$$p = \{C, X, (ldir, ldist), (cdir, cdist), (rdir, rdist), Compas, Timer\},$$

где C — идентификатор объекта (например, цвет); X — признак опорного объекта; $(ldir, ldist)$, $(cdir, cdist)$, $(rdir, rdist)$ — направление и расстояние до левой границы, центра объекта

и правой границы соответственно; $Compas$ — значение датчика "компас"; $Timer$ — номера тактов в начале и в конце отрезка пути.

Основным элементом маршрута является ориентир, состоящий из одного или нескольких объектов. В общем случае распознавание объектов обычно подразумевает учет многих параметров, например, формы, цвета и узора, а также пространственных атрибутов (отношение линейных размеров, положение в пространстве [24]). В данном методе учитываются линейные размеры объектов, их цвет, близость объектов в соответствии с (1), положение объектов относительно друг друга (слева / справа) и направление на них по компасу.

Отношения "слева" и "справа" зависят от выбранного ракурса и могут меняться во время движения. В связи с этим используется подход на основе одной из разновидностей псевдофизической логики (ПФЛ) — пространственной логики. Примером применения ПФЛ для построения динамической модели окружающего мира служит работа [26], в которой начало системы координат связано с роботом, и введен набор правил определения отношений между объектами окружающей среды и роботом.

Аналогичным образом введем правила, прогнозирующие на основе логического вывода изменение положения объектов при выполнении аниматом элементарных действий. Табл. 3 содержит матрицу переходов с возможными изменениями направления на ориентир в зависимости от действий анимата. Например, если ориентир был впереди, а анимат поворачивает налево, то ориентир переместится в положение справа-впереди или останется впереди. D_NOT означает уход ориентира из поля зрения (его отсутствие).

Общий алгоритм работы следующий:

1. Анимат-разведчик начинает путь от "дома". Если он не видит ни одного ориентира,

Таблица 3
Table 3

Матрица переходов для правил ПФЛ
The transition matrix for pseudo-physical logic rules

Положение ориентира	Назад	Налево	Вперед	Направо	Стоп
Отсутствует	D_NOT	D_NOT	D_NOT	D_NOT	D_NOT
Слева	D_FL	D_FL	D_NOT	D_NOT	D_L
Слева-впереди	D_F	D_F	D_L	D_L	D_FL
Впереди	D_F	D_FR	D_F	D_FL	D_F
Справа-впереди	D_F	D_R	D_R	D_F	D_FR
Справа	D_FR	D_NOT	D_NOT	D_FR	D_R

он идет вперед, пока не увидит хотя бы один ориентир.

2. Если в процессе перемещения анимат видит "пищу", он запоминает текущую сцену как элемент описания маршрута и идет к "пище".

3. Из видимых ориентиров он выбирает опорный ориентир, направление его обхода (слева или справа) и запоминает его как элемент описания маршрута.

4. Анимат совершает обход опорного ориентира.

5. Если после завершения обхода опорного ориентира он видит хотя бы один новый ориентир, он переходит к п. 3. Если не видит ни одного, совершает поворот до тех пор, пока не увидит подходящий ориентир. (Он поворачивает налево, если обходил ориентир слева, и направо в противном случае).

6. После нахождения пищи анимат возвращается домой, используя данные компаса, и передает описание маршрута второму анимату (фуражиру).

Фуражир действует по тому же алгоритму, но не ищет новый ориентир, а сопоставляет сцены из маршрута с тем, что видит вокруг себя. При успешном сопоставлении он обходит опорный ориентир и переходит к следующей сцене. При неудаче запускает процедуру поиска опорного ориентира в текущей или следующей сцене, аналогично муравью, потерявшему ориентир. К следующей сцене анимат переходит, если поиск в текущей сцене неудачен и истекла половина времени (числа тактов), которое анимат должен был провести на данном отрезке пути.

В качестве обоснования выбора именно половины длины отрезка как реперной точки использовались данные о поведении *Melophorus bagoti* (M. bagoti). В отсутствие знакомых ориентиров они прибегают к интеграции пути и начинают двигаться в сторону, где предположительно находится гнездо, осматривая окружающую местность. Но поиск M. bagoti начинается не там, где должно находиться гнездо, а примерно на полпути между местом расположения гнезда и источником пищи [27]. Предполагается, что муравьи при этом ищут знакомые визуальные сигналы вдоль маршрута, а не само гнездо.

При поиске фуражир соблюдает общее направление движения на текущем отрезке пути в соответствии с данными компаса. Механизм реализации компаса в данном случае несущественен. В реальных условиях это может быть как информация, полученная извне, так и не-

кий "внутренний" датчик, который имитирует компас насекомых [28]. Заметим, что в данной работе для имитации компаса использовалась информация от полигона.

При прохождении маршрута фуражир сопоставляет видимую сцену (S^v) и сцену S_i из описания маршрута (i — номер сцены в описании). Сцены сравниваются как наборы ориентиров с учетом размеров, направлений и отношений между ними. Если сцены S^v и S_i признаются похожими, то анимат разворачивается к опорному ориентиру так, чтобы видеть его с того же ракурса, что и разведчик при первом проходе. Добившись таким образом максимального соответствия сцен, он запускает процедуру обхода опорного ориентира.

В связи с тем, что в процессе сопоставления сцен приходится учитывать множество параметров, в том числе, разные варианты несоответствия сцен S^v и S_i , была разработана система подсчета ранга, учитывающая *тройки ориентиров*: опорный ориентир и ориентиры слева и справа от опорного. Значение ранга, при котором сцены S^v и S_i признаются похожими, было определено экспертным путем и уточнено в процессе моделирования.

Управление поведением анимата осуществляется на основе конечных автоматов. Архитектура системы управления является трехуровневой. Такая архитектура позволяет относительно просто изменять поведение анимата без изменения его структуры, базовых возможностей и самой моделирующей программы. Мета-мета-автомат управляет переходами от одного поведения к другому в зависимости от состояния анимата (рис. 4).

Автоматы второго уровня (мета-автоматы) отвечают за реализацию поведения ("поиск

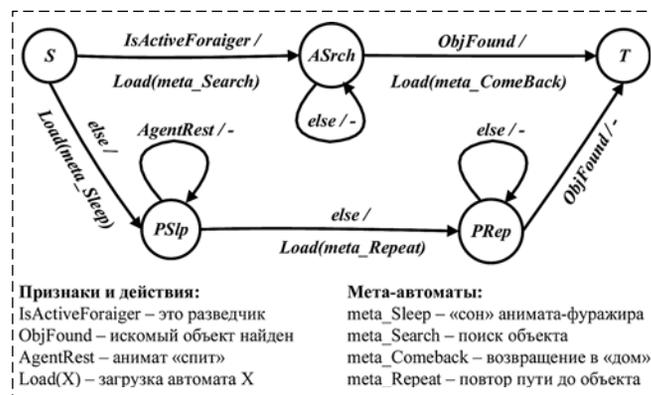


Рис. 4. Мета-мета-автомат "Фуражирование"

Fig. 4. Meta-meta-automat "Foraging"

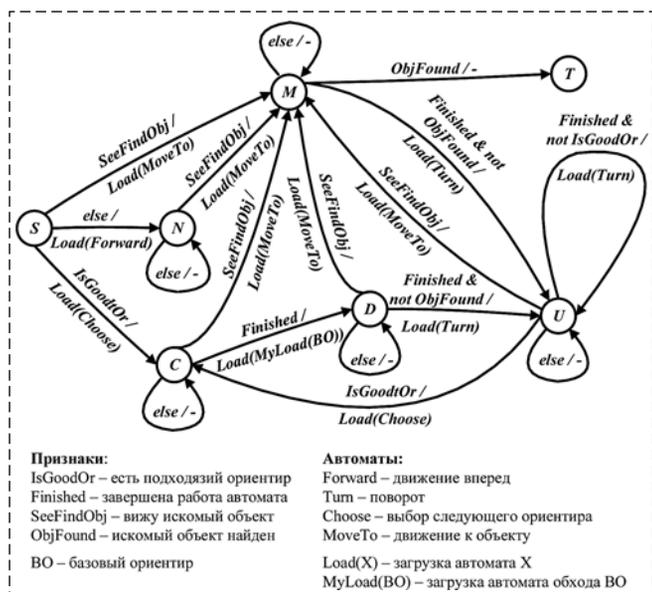


Рис. 5. Мета-автомат поиска "пищи" meta_fsm_Search
 Fig. 5. Meta-meta-automat of food search meta_fsm_Search

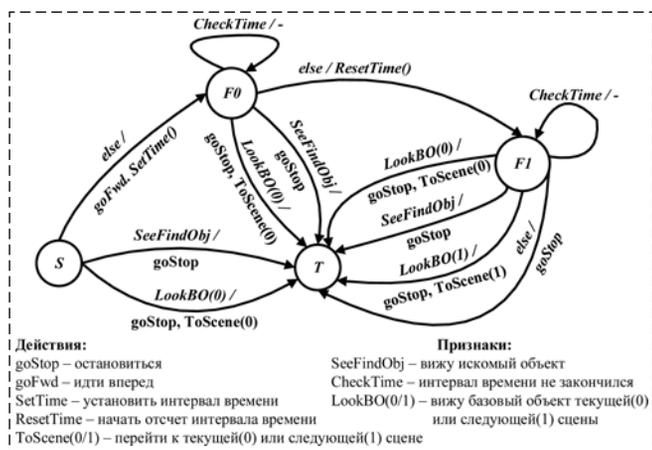


Рис. 6. Автомат поиска потерянного ориентира fsm_FindBO
 Fig. 6. Lost landmark search automat fsm_FindBO

еды" (рис. 5), "повтор пути" и др.). Автоматы нижнего уровня отвечают за выполнение основных поведенческих процедур, например, "обойти ориентир X слева", "найти потерянный ориентир X" (рис. 6) и т. д.

Результаты экспериментов

Моделирование проводилось на упрощенной задаче фуражировки: не рассматривался этап возвращения разведчика в "дом" (при наличии компаса этот процесс является довольно простым). В ходе эксперимента сначала анимат-разведчик перемещался по полигону в поисках объекта заданного цвета ("пищи"), не имея данных о его местоположении. После нахождения

объекта сформированный маршрут передавался фуражиру, который его повторял. Эксперименты проводились в системе многоагентного моделирования Kvoqum, созданной в НИЦ "Курчатовский институт" [29]. Полигон — область 100×100 клеток, время моделирования — 10000 тактов для каждого эксперимента.

Любой маршрут начинался от "дома" (круг на рис. 7), начальная ориентация аниматов — произвольная. Ориентиры генерировались случайным образом и включали 1, 2 или 3 объекта, число цветов — 6, число ориентиров — 48, 60, 72 или 84. Целевой объект ("пища") — шестиугольник на рис. 7, число целевых объектов — 5. Линии от "дома" к "пище" — это визуализация путей разведчика и фуражира. Иногда они идут параллельными путями (рис. 7, а), но часто эти пути почти сливаются в одну линию (рис. 7, б, в).

Табл. 4 содержит статистику по экспериментам. В зависимости от числа тактов моделирования T , которые потребовались для прохождения маршрута, данные разделены на три примерно равные части: короткие (до 1000 тактов), средние (от 1000 до 2000) и длинные (более 2000 тактов). На всех маршрутах наблюдается незначительное увеличение времени (примерно на 100...200 тактов), которое требуется последователю для прохождения маршрута. Это обусловлено необходимостью разворотов для более точного сопоставления сцен. В среднем примерно в 50 % случаев неудач последователь находил другой искомый объект раньше, чем проходил весь маршрут, и поэтому уходил с него: эти эксперименты являются *относительно* неудачными (данные выделены полужирным шрифтом).

Значение E_{cp} показывает, какой процент пути последователь прошел по маршруту, прежде чем сбиться с него. Для коротких маршрутов E_{cp} равен 100 %, и это соответствует одной из двух ситуаций: (1) в начальной позиции аниматы располагались так, что каждый из них видел свой искомый объект, и они сразу шли каждый к своему объекту; (2) идя параллельными путями, разведчик и фуражир на последнем отрезке видели разные целевые объекты, расположенные близко друг к другу, и шли каждый к своему объекту.

На рис. 8 приведены некоторые зависимости: M — это объем памяти (число объектов), которые запоминает анимат в процессе поиска; N_e — число объектов в одном ориентире (1, 2 или 3). Естественно, объем памяти почти линейно зависит от числа объектов, входящих в ориен-

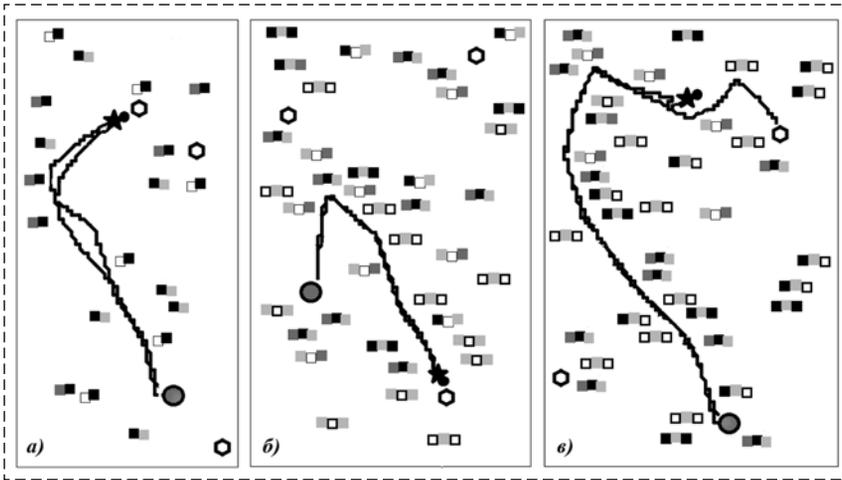


Рис. 7. Примеры маршрутов:

a — маршрут средней длины без резких поворотов; *b* — маршрут средней длины с резким поворотом; *c* — длинный маршрут (последовательно не хватило времени для прохождения маршрута целиком)

Fig. 7. Route examples:

a — the middle route without sharp turns; *b* — the middle route with sharp turn; *c* — the long route (the forager did not have enough time to complete the route)

Таблица 4
Table 4

Результаты моделирования
Simulation experiments results

Маршруты	T — среднее число тактов для разведчика/фуражира	Число неудач, % абс./отн.	Причины неудач			E_{cp} , %
			Нашел другой объект ближе/дальше	Не нашел ничего	Не хватило времени	
Короткие	581/783	2,6/1,4	5/4	—	—	100
Средние	1420/1599	16,3/9,4	14/19	7	—	70
Длинные	2649/2801	27,8/12,7	24/20	9	13	43

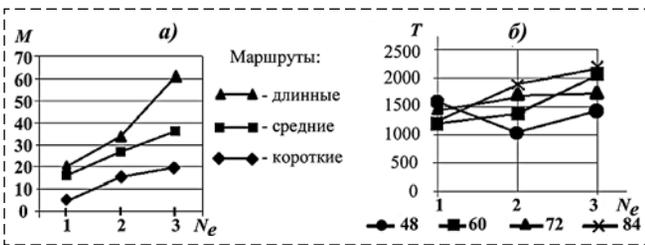


Рис. 8. Зависимости:

a — объема памяти M от длины маршрута T и числа объектов N_e в ориентире (1, 2, 3); *b* — средней длины маршрута T от числа ориентиров на полигоне (48, 60, 72, 84) и числа объектов N_e в ориентире (1, 2, 3)

Fig. 8. Dependencies:

a — memory size M on the route length T and the number of objects N_e in the landmark (1, 2, or 3); *b* — average route length T on the number of landmarks on the polygon (48, 60, 72, or 84) and the number of objects N_e in the landmark (1, 2, or 3)

тир (рис. 8, *a*), и растет при увеличении длины маршрута. Среднее время T (точнее, среднее число тактов) растет при увеличении числа ориентиров на полигоне (рис. 8, *b*): это объясняет

ся тем, что анимат тратит время на обход ориентиров. Также время поиска растет при увеличении числа объектов в ориентире: это объясняется тем, что ориентиры перекрывают искомые объекты. Исключением является ситуация с малым числом ориентиров (48): здесь отсутствие видимых ориентиров заставляет анимата часто поворачивать в поисках ориентира, что также увеличивает время поиска.

Было бы интересно провести сравнение эффективности навигации у полученного анимата и у модельного вида *Formica rufa*, но здесь возникают некоторые проблемы. В натуральных наблюдениях подобная статистика не подсчитывается, так как это чрезвычайно трудоемкий процесс. Муравьи-разведчики чаще ведут фуражиров за собой, чем передают им сведения о местоположении пищи. В естественных условиях сложной задачей является выделение таких актов и наблюдение за фуражиром, который отправился на поиски пищи после контакта с разведчиком: это единичные наблюдения, а сравнивать показатели можно только при наличии статистически достоверных данных. Если же говорить о лабораторных опытах, то

условия их проведения отличаются от тех, которые есть в природе и которые моделировались в данной работе. Здесь — свободный поиск, в лабораторных опытах с муравьями — набор дорожек, образующих структуру типа "дерево", с возможностью перемещаться только по дорожкам. Поэтому сравнивать результаты по эффективности навигации было бы некорректно.

Но можно сопоставить продолжительность пути анимата и муравья-разведчика по числу ориентиров (развилка пути). В работе [7] число развилки варьировалось от двух до шести. При этом утверждается, что эффективность подобного вида фуражировки у самих муравьев очень невелика. В случае двух развилки все активные разведчики и их группы (до 15 на колонию) были успешными, тогда как в случае шести развилки только один или два справились с задачей. В то же время результаты моделирования показали, что при числе

ориентиров от 1 до 3 успешность поиска у анимата составляет в среднем 91 %, при 4...6 ориентирах — 75 %, при 7...9 ориентирах — 60 %, т. е. предложенный метод с этой точки зрения является более эффективным, чем ориентация муравьев в лабораторных условиях.

Заключение

В данном исследовании разработан и реализован механизм, имитирующий поведение муравья, которое он демонстрирует в ходе фуражировки или разведки, и показано, что это можно сделать достаточно ограниченными средствами. Он не требует однозначной идентификации визуальных ориентиров и работает как в условиях перегруженности полигона ориентирами, так и при малом их числе, когда на полигоне есть области, из которых ориентиры не видны.

Для решения задачи рекогносцировки необходимо изменить условие достижения цели: вместо условия "нашел пищу" ввести, например, ограничение на пройденное расстояние или условие "достижение точки, из которой не видны ориентиры". В дальнейшем планируется перенести этот механизм на группу реальных роботов в рамках решения задач фуражировки, патрулирования территории и рекогносцировки.

Список литературы

1. **Cruse H., Wehner R.** No need for a cognitive map: Decentralized memory for insect navigation // *PLoS Comput. Biol.* 2011. Vol. 7, N. 3.
2. **Sun X., Yue S., Mangan M.** A decentralised neural model explaining optimal integration of navigational strategies in insects // *Elife.* 2020. Vol. 9, N. 7. P.1–30.
3. **Wilson E. O.** Chemical communication among workers of the fire ant *Solenopsis saevissima*. 1. The organization of mass foraging // *Anim. Behav.* 1962. Vol. 10. P. 134–147.
4. **Reznikova Z.** Spatial cognition in the context of foraging styles and information transfer in ants // *Anim. Cogn.* 2020. Vol. 23, N. 6. P. 1143–1159.
5. **Длусский Г. М.** Муравьи рода *Формика*. М.: Наука, 1967. 236 с.
6. **Ryabko B., Reznikova Z.** The Use of Ideas of Information Theory for Studying "Language" and Intelligence in Ants // *Entropy.* 2009. N. 11. P. 839–853.
7. **Reznikova Z.** Experimental paradigms for studying cognition and communication in ants (Hymenoptera: Formicidae) // *Myrmecological News.* 2008. Vol. 11. P. 201–214.
8. **Müller M., Wehner R.** Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis* // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 1988. Vol. 85, N. July. P. 5287–5290.
9. **Narendra A.** Homing strategies of the Australian desert ant *Melophorus bagoti* II. Interaction of the path integrator with visual cue information // *J. Exp. Biol.* 2007. Vol. 210, N. 10. P. 1804–1812.

10. **Wystrach A., Graham P.** What can we learn from studies of insect navigation? // *Anim. Behav.* 2012. Vol. 84, N.1. P. 13–20.

11. **Wehner R.** The architecture of the desert ant's navigational toolkit (Hymenoptera: Formicidae) // *Myrmecol News.* 2009. N. 12. P. 85–96.

12. **Wystrach A., Schwarz S., Schultheiss P., Beugnon G., Cheng K.** Views, landmarks, and routes: How do desert ants negotiate an obstacle course? // *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sensory, Neural, Behav. Physiol.* 2011. Vol. 197, N. 2. P. 167–179.

13. **Захаров А. А.** Муравей. Семья. Колония. М.: Фитон XXI, 2018. 192 с.

14. **Collet M., Collett T. S.** The learning and maintenance of local vectors in desert ant navigation // *J. Exp. Biol.* 2009. Vol. 212. P. 895–900.

15. **Lambrinos D., Möller R., Labhart T., Pfeifer R., Wehner R.** A mobile robot employing insect strategies for navigation // *Rob. Auton. Syst.* 2000. Vol. 30, N. 1. P. 39–64.

16. **Vardy A.** Long-range visual homing // 2006 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBIO 2006. P. 220–226.

17. **Yu S. E., Kim D.** Image-based homing navigation with landmark arrangement matching // *Inf. Sci. (Ny).* 2011. Vol. 181, N. 16. P. 3427–3442.

18. **Stelzer A., Mair E., Suppa M.** Trail-Map: A scalable landmark data structure for biologically inspired range-free navigation // 2014 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics. IEEE ROBIO 2014. P. 2138–2145.

19. **Карпова И. П.** К вопросу о представлении маршрута мобильного робота на основе визуальных ориентиров // *Мехатроника, автоматизация, управление.* 2017. Т. 18, № 2. С. 81–89.

20. **Wilson S. W.** Classifier Systems and the Animat Problem // *Mach. Learn.* 1987. Vol. 2, N. 3. P. 199–228.

21. **Захаров А. А.** и др. Мониторинг муравьев *Формика*. М.: КМК, 2013. 99 с.

22. **Baddeley B., Graham P., Husband P., Philippides A.** A model of ant route navigation driven by scene familiarity // *PLoS Comput. Biol.* 2012. Vol. 8, N. 1.

23. **Roseboom W., Fountas Z., Nikiforou K., Bhowmik D., Shanahan M., Seth A. K.** Activity in perceptual classification networks as a basis for human subjective time perception // *Nat. Commun.* 2019. Vol. 10, N. 1. P. 1–10.

24. **Московский А. Д.** Система навигации автономного мобильного робота на основе метода реконструкции сцен. / II Всероссийский научно-практический семинар "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта" (БТС-ИИ-2015). 2015. С. 66–73.

25. **Карпов В. Э.** Об одном механизме реконструкции схем // VI Международная научно-практическая конференция "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". Сб. науч. трудов в 2-х т. Т. 1. М.: Физматлит, 2011. С. 407–415.

26. **Карпов В. Э.** Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике // XIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16–20 октября 2012 г., Белгород): Труды конференции. 2012. Т. 3. С. 275–283.

27. **Narendra A.** Homing strategies of the Australian desert ant *Melophorus bagoti* I. Proportional path-integration takes the ant half-way home // *J. Exp. Biol.* 2007. Vol. 210, N. 10. P. 1798–1803.

28. **Dupeyroux J., Viollet S., Serres J. R.** An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation // *Rob. Auton. Syst.* 2019. Vol. 117. P. 40–56.

29. **Карпов В. Э., Ровбо М. А., Овсянникова Е. Е.** Система моделирования поведения групп робототехнических агентов с элементами социальной организации Кворум // Программные продукты и системы. 2018. Т. 31, № 3. С. 581–590.

Animate Orientation Based on Visual Landmarks and Scene Recognition

I. P. Karpova, karpova_ip@mail.ru,

National Research University, Higher School of Economics (HSE), Moscow, 101000, Russian Federation

Corresponding author: I. P. Karpova, Cand. Tech., Associate Professor, National Research University, Higher School of Economics (HSE), Moscow, 101000, Russian Federation, karpova_ip@mail.ru,

Accepted on July 12, 2021

Abstract

A biologically-inspired approach to robot route following is presented. The ant of the genus *Formica rufa* (a red forest ant) is used as a model species. These ants actively use collective foraging, unlike many other ant species. The scout ant remembers the route to food and can transmit information about the food location to foraging ants. Foragers can independently reach this place using this data and return home. The basis of the proposed method is the memorization the way by visual landmarks and fuzzy control. The animate path description model consists of a sequence of scenes and includes compass to account for the direction. The behavior of the animate-scout is implemented using an algorithm that simulates the foraging behavior of ants. The animate-forager performs actions to reproduce the route, applying the developed set of rules. The forager behavior is based on the same principles as that of a scout. But the scout remembers the scenes, and the forager recognizes and compares the visible scene and the scene from the route description. The actions of animates are presented in the form of elementary behavioral procedures. Each behavioral procedure is implemented using a finite state machine. The experiments for solving the foraging problem were carried out using a modeling system based on the ROS framework. The simulation results confirm the effectiveness of the proposed method. The method does not require large computing power and advanced sensory capabilities from the robot. It can also be used in reconnaissance and patrol tasks.

Keywords: autonomous mobile robot, fuzzy control, ant navigation, scene recognition, space-time orientation, foraging and reconnaissance tasks

For citation:

Karpova I. P. Animate Orientation Based on Visual Landmarks and Scene Recognition, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 537–546.

DOI: 10.17587/mau.22.537-546

References

1. Cruse H., Wehner R. No need for a cognitive map: Decentralized memory for insect navigation, *PLoS Comput. Biol.*, 2011, vol. 7, no. 3.
2. Sun X., Yue S., Mangan M. A decentralized neural model explaining optimal integration of navigational strategies in insects, *Elife*, 2020, vol.9, no.7, pp. 1–30.
3. Wilson E. O. Chemical communication among workers of the fire ant *Solenopsis saevissima*. 1. The organization of mass foraging, *Anim. Behav.* 1962, vol. 10, pp. 134–147.
4. Reznikova Z. Spatial cognition in the context of foraging styles and information transfer in ants, *Anim. Cogn.*, 2020, vol. 23, no. 6, pp. 1143–1159.
5. Dlusskiy G. M. Family Formicidae ants, Moscow, Nauka, 1967, 236 p. (in Russian).
6. Ryabko B., Reznikova Z. The Use of Ideas of Information Theory for Studying "Language" and Intelligence in Ants, *Entropy*, 2009, no. 11, pp. 839–853.
7. Reznikova Z. Experimental paradigms for studying cognition and communication in ants (Hymenoptera: Formicidae), *Myrmecological News*, 2008, vol. 11, pp. 201–214.
8. Müller M., Wehner R. Path integration in desert ants, *Cataglyphis fortis*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1988, pp. 5287–5290.
9. Narendra A. Homing strategies of the Australian desert ant *Melophorus bagoti* II. Interaction of the path integrator with visual cue information, *J. Exp. Biol.*, 2007, vol. 210, no. 10, pp. 1804–1812.
10. Wystrach A., Graham P. What can we learn from studies of insect navigation? // *Anim. Behav.* 2012, vol. 84, no. 1, pp. 13–20.
11. Wehner R. The architecture of the desert ant's navigational toolkit (Hymenoptera: Formicidae), *Myrmecol News*, 2009, no. 12, pp. 85–96.
12. Wystrach A. et al. Views, landmarks, and routes: How do desert ants negotiate an obstacle course? *J. Comp. Physiol. A Neuroethol. Sensory, Neural, Behav. Physiol.*, 2011, vol. 197, no. 2, pp. 167–179.
13. Zaxarov A. A. Ant, family, colony, Moscow, Fiton XXI, 2018, 192 p. (in Russian).
14. Collet M., Collett T. S. The learning and maintenance of local vectors in desert ant navigation, *J. Exp. Biol.*, 2009, vol. 212, pp. 895–900.
15. Lambrinos D. et al. A mobile robot employing insect strategies for navigation, *Rob. Auton. Syst.*, 2000, vol. 30, no. 1, pp. 39–64.
16. Vardy A. Long-range visual homing, *2006 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, ROBOT 2006*, pp. 220–226.
17. Yu S. E., Kim D. Image-based homing navigation with landmark arrangement matching, *Inf. Sci. (Ny)*, 2011, vol. 181, no. 16, pp. 3427–3442.
18. Stelzer A., Mair E., Suppa M. Trail-Map: A scalable landmark data structure for biologically inspired range-free navigation, *2014 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, IEEE ROBOT 2014*, pp. 2138–2145.
19. Karpova I. P. On the question of representing the route of a mobile robot based on visual landmarks, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 2, pp. 81–89 (in Russian).
20. Wilson S. W. Classifier Systems and the Animat Problem, *Mach. Learn.* 1987, vol. 2, no. 3, pp. 199–228.
21. Zaxarov A. A. et al. Monitoring of Formika ants, Moscow, KMK, 2013, 99 p. (in Russian).
22. Baddeley B. et al. A model of ant route navigation driven by scene familiarity, *PLoS Comput. Biol.*, 2012, vol. 8, no. 1.
23. Roseboom W. et al. Activity in perceptual classification networks as a basis for human subjective time perception, *Nat. Commun.*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 1–10.
24. Moskovskij A. D. Navigation system of an autonomous mobile robot based on the method of scene reconstruction, *II All-Russian scientific and practical seminar "Unmanned vehicles with elements of artificial intelligence" (BTS-AI-2015)*, Saint Petersburg, Politehnika-servis, 2015, pp. 66–73 (in Russian).
25. Karpov V. E. About one mechanism of scheme reconstruction, *Proceedings of the VI International Scientific and practical Conference "Integrated models and soft computing in artificial intelligence"*, Moscow, Fizmatlit, 2011, vol. 1, pp. 407–415 (in Russian).
26. Karpov V. E. Private mechanisms of leadership and consciousness in a swarm robotics, *Proceedings of the XIII National Conference on artificial intelligence with the international participation (CAI-2012)*, Publishing house of BGTU, 2012, pp. 275–283 (in Russian).
27. Narendra A. Homing strategies of the Australian desert ant *Melophorus bagoti* I. Proportional path-integration takes the ant half-way home, *J. Exp. Biol.*, 2007, vol. 210, no. 10, pp. 1798–1803.
28. Dupeyroux J., Viollet S., Serres J. R. An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation, *Rob. Auton. Syst.*, 2019, vol. 117, pp. 40–56.
29. Karpov V. E., Rovbo M. A., Ovsyannikova E. E. A system for modeling the behavior of groups of robotic agents with elements of a social organization Quorum, *Programmye produkty i sistemy*, 2018, vol. 31, no. 3, pp. 581–590 (in Russian).

Я. В. Калинин, канд. техн. наук, доц., jkv83@mail.ru, Е. А. Марчук, аспирант, e.marchuk@innopolis.ru,
Университет Иннополис, г. Иннополис,
Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград

Особенности учета конструктивной нелинейности в модели динамики тросового робота*

Рассматривается задача моделирования динамики параллельного полноприводного тросового робота с включением конструктивной нелинейности тросов в математическую модель, реализуемую в компьютерной модели с возможностью использования символьных вычислений. Параллельные тросовые роботы как вид робототехники получили постепенное распространение и признание в последние три десятилетия. Вместе с расширением практического использования тросовых роботов осуществлялись исследования в теоретической области, и происходило уточнение математической модели тросовой системы. Составление динамической модели тросового робота является нетривиальной задачей. Тросовые роботы являются сильно нелинейными системами, основной причиной нелинейности становятся свойства тросовой системы. Как элемент механической системы трос является односторонней связью, поскольку трос работает только на растяжение, но не на сжатие. Таким образом, тросы являются конструктивно нелинейными элементами системы. Вместе с тем, тросы обладают свойством провисания под собственным весом. Таким образом, тросы являются геометрически нелинейными элементами системы. При условии высокой нагруженности тросовой системы, т. е. при массе полезной нагрузки, многократно превышающей массу каждого отдельно взятого троса, можно считать тросы натянутыми без провисания и пренебречь геометрической нелинейностью. Поскольку в компьютерной модели, реализующей математическую модель динамики тросового робота, могут использоваться символьные вычисления, становится необходимым включение условия конструктивной нелинейности таким способом, чтобы обеспечить возможность символьных вычислений.

Целью настоящего исследования является разработка метода, обеспечивающего включение конструктивной нелинейности тросовой системы в математическую модель с учетом возможной реализации компьютерной модели на символьных вычислениях. Рассматривается проблема включения математической модели тросов как односторонней связи в модели высоконагруженных тросовых роботов. Приводятся обоснования для включения функций активации в систему уравнений динамики тросового робота. С использованием предложенного метода и с учетом сопротивления тросов только растяжению, но не сжатию, получено численное решение прямой задачи динамики высоконагруженного параллельного тросового робота с включением функций активации в систему дифференциальных уравнений модели динамики.

Ключевые слова: тросовый робот, функция активации, дифференциальные уравнения

Введение

При решении задач динамики параллельных тросовых роботов возможно использование различных моделей тросов. В первом приближении может использоваться модель троса как невесомого и нерастяжимого стержня. Более распространенной является модель троса как невесомого упругого стержня. Модели стержней не учитывают провисания тросов в пролетах между точками закрепления, однако просты в расчетах. Более адекватными являются модели тросов как тяжелых гибких нитей, растяжимых, либо нерастяжимых, они сложнее в расчетах [1–3]. Принимая такую модель, следует учитывать возможные затруднения при осуществлении расчетов в реальном времени. Существуют точные модели канатов и тросов, учитывающие провисание, растяже-

ние, продольные, поперечные и крутильные колебания и иные явления [4, 5]. Такие модели наиболее адекватны реальным процессам, однако требуют значительных вычислительных затрат, их невозможно рассчитывать в реальном времени. Точные модели канатов и тросов, как правило, используются при описании крупногабаритных систем и объектов: шахтных подъемников, кабельных кранов, канатных дорог и т. д. [5–9]. В расчетах тросовых роботов тросы могут считаться тяжелыми гибкими нитями, растяжимыми, либо нерастяжимыми [10–13]. В расчетах высоконагруженных тросовых роботов, учитывая сильное натяжение тросов, считается, что тросы не провисают, и их можно считать стержнями [14, 15]. Поскольку масса каждого троса высоконагруженного тросового робота мала в сравнении с массой полезной нагрузки, закрепленной на тросах, тросы можно считать невесомыми. В настоящей работе рассматривается модель троса как невесомого упругого стержня.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 19-08-01234).

Тросы как односторонние связи

С точки зрения механики тросы являются односторонними связями. Модель невесомого упругого стержня, соответствующая непровисающему тросу, должна работать только на растяжение. Отличительной особенностью односторонних связей является то, что они задаются неравенствами, в отличие от двусторонних связей, которые определяются уравнениями [16]. Механические системы, включающие односторонние связи, являются конструктивно нелинейными. Геометрическая нелинейность, проявляющаяся в моделях гибких нитей, в моделях стержней отсутствует. В литературе приводятся различные методы расчетов для систем с односторонними связями [17]. Также приводятся различные методы расчета тросовых конструкций в висячих системах [18, 19]. Однако перечисленные методы в большей степени соответствуют статическим задачам расчетов зданий и архитектурных сооружений и не удовлетворяют в полной мере задачам динамики тросового робота. Заменяем односторонние связи усилиями, соответствующими силам натяжения тросов, и перейдем к следующему этапу.

Динамика параллельного тросового робота

В компактной матричной форме уравнение динамики параллельного тросового робота имеет вид

$$MT\ddot{q} - DT\dot{q} + g_c = w_p + A^T f, \quad (1)$$

где M — матрица масс; D — матрица затухания; T — матрица однородных преобразований; q — вектор обобщенных координат; g_c — фактор воздействия центробежной и кориолисовой сил; w_p — динамический винт внешних сил; A^T — транспонированная матрица Якоби; f — вектор сил натяжений в тросах.

Принимая во внимание неспособность троса к сопротивлению сжатию, уравнение для силы натяжения i -го вытравленного троса обычно записывают в виде кусочной функции:

$$f = \begin{cases} c_i(l_i(\theta_i))\Delta l_i(x, \theta_i) + d_i(l_i(\theta_i))\Delta \dot{l}_i(x, \theta_i), & \text{если } \Delta l_i > 0; \\ 0, & \text{если } \Delta l_i \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где f_i — сила натяжения i -го троса; E — модуль Юнга материала троса; c_i — жесткость i -го вытравленного троса; d_i — коэффициент внутреннего сопротивления i -го вытравленного троса; θ_i — угол поворота i -й лебедки; l_i — длина i -го вытравленного троса; Δl_i — изменение длины i -го вытравленного троса.

В этом случае трос определяется как вязкоупругое тело согласно модели Фойгта [20]:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon}, \quad (3)$$

где σ — механическое напряжение; E — модуль Юнга материала троса; η — динамическая вязкость материала троса; ε — относительное удлинение троса.

Модель Фойгта выводится из соотношений

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta l}{l_0} + \eta \frac{\Delta \dot{l}}{l_0}; \quad (4)$$

$$F = \frac{EA}{l_0} \Delta l + \frac{\eta A}{l_0} \Delta \dot{l} \quad (5)$$

и далее приводится к виду (2).

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение мобильной платформы параллельного тросового робота, не может быть решена аналитически, но может быть проинтегрирована численным методом. Заметим, что представленная выше кусочная функция (2) может осложнить процесс интегрирования встроенными инструментами пространственных вычислительных пакетов. Постараемся избавиться от кусочной функции, при этом сохранив условие неспособности троса к сопротивлению сжатию.

Включение функций активации в модель троса

Как отмечалось выше, реальные тросы имеют сложную структуру и при этом достаточно точно описываются сложными математическими моделями. Следует учитывать, что канаты не имеют предела текучести, и характер их реакции на нагрузку не в точности соответствует закону Гука. Упругое удлинение каната существенно больше, чем у стержня с таким же диаметром из того же материала той же исходной длины. Модуль упругости каната является переменной величиной, в теоретических работах описываются методы его оценки [8]. Однако считается, что наиболее точное значение для конкретного образца определяется экспериментальным путем.

Экспериментальное определение вязкоупругих характеристик канатов и тросов описывается в работах [21, 22]. Геликоидная структура свитых прядей троса в начале работы троса на растяжение может обеспечивать участок "холостого хода". Точные модели учитывают эти факторы, принимая в расчет углы закручивания прядей и прочие параметры. В упрощенную модель троса как нелинейно упругого невесомого стержня для обеспечения свойства "холостого хода" в работе односторонней связи предлагается включать функцию активации. Следует принимать во внимание, что реальные тросы в процессе эксплуатации вытягиваются и обжимаются, и эффект "холостого хода" на эксплуатируемых в течение продолжительного времени тросах практически полностью исчезает.

Как правило, функции активации используются в задачах теории автоматического управления [23]. В настоящее время наиболее широкое распространение функции активации находят в различных моделях искусственных нейронных сетей [24, 25]. Принцип действия функции активации заключается в изменении значения функции в момент достижения некоторого порогового значения аргумента. Для дальнейшего численного решения дифференциальных уравнений встроенными инструментами наиболее популярных вычислительных пакетов требуется соблюдение условия гладкости и непрерывности интегрируемой функции. Соответственно, выбирать следует гладкую и непрерывную функцию активации. В дальнейших расчетах будет использоваться сигмоидальная функция вида

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{a+bx}}. \quad (6)$$

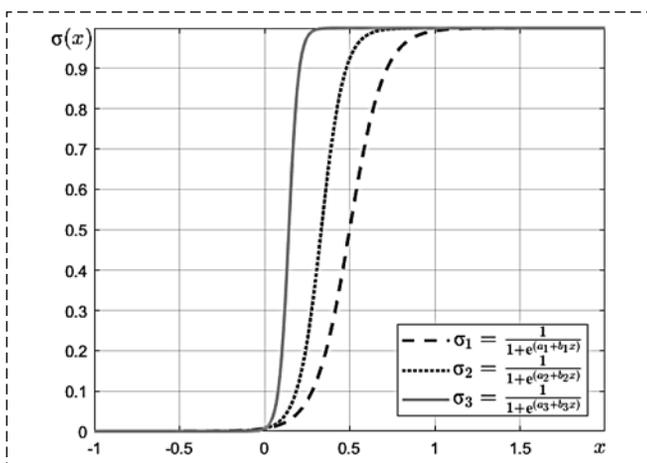


Рис. 1. Сигмоидальные функции активации
Fig. 1. Sigmoidal activation functions

Изменение параметров функции a и b позволяет регулировать скорость интенсивного возрастания сигмоида, и, следовательно, задавать значение интервала "холостого хода" троса (рис. 1).

Включение функций активации в систему дифференциальных уравнений динамики параллельного тросового робота

Как замечено выше, тросы могут работать только на растяжение, но не на сжатие. В большинстве изданий и статей авторы ограничиваются условием (2), не вдаваясь в подробности вычислительной реализации [14, 26]. Однако включение условия работы троса только на растяжение с условием интервала "холостого хода" в систему дифференциальных уравнений может оказаться нелегкой задачей. Вместе с тем, включение сигмоидальных функций активации в систему дифференциальных уравнений обеспечивает условие работы тросов только на растяжение (опционально — с подключением условия "холостого хода" через изменение параметров сигмоида):

$$MT\ddot{q} - DT\dot{q} + g_c = w_p + A^T f \left[\frac{1}{1 + e^{a+b\Delta l}} \right]. \quad (7)$$

Параметры сигмоидальной функции активации подбираются таким образом, чтобы функция имела участок, соответствующий "холостому ходу" (при условии его существования) и была смещена вправо по оси абсцисс так, чтобы обеспечивать соответствие начала участка резкого возрастания функции минимальному положительному значению аргумента (рис. 1). Значение смещения определяется требованиями точности.

Параметры сигмоидальной функции активации выбираются таким образом, чтобы обеспечить почти ступенчатую форму сигмоида и задать условие работы троса только на растяжение без участка "холостого хода". При условии $\Delta l_i \leq 0$ функция активации почти равна нулю и, соответственно, можно считать $f(\Delta l_i) \frac{1}{1 + e^{a+b\Delta l_i}} \approx f(\Delta l_i) \cdot 0$. Участок резкого возрастания сигмоида обеспечивает быстрый переход от нуля к единице, обеспечивая ступенчатый переход при соблюдении условия гладкости и непрерывности функции активации. При условии $\Delta l_i > 0$ функция активации почти равна единице и, соответственно, мож-

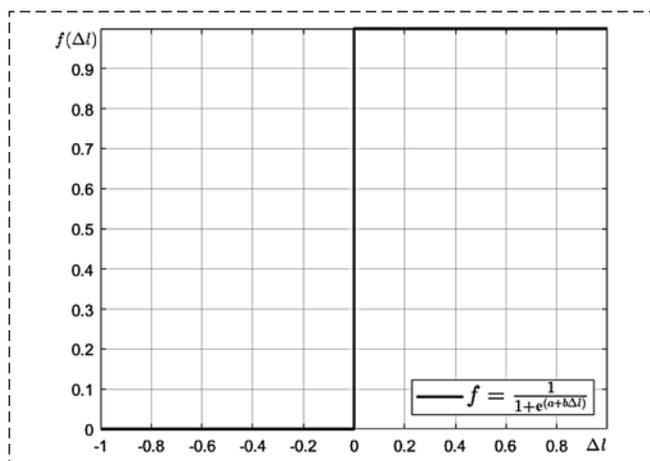


Рис. 2. Функция активации, обеспечивающая условие работы троса только на растяжение

Fig. 2. Activation function which provides only stretching, not compression

но считать $f(\Delta l_i) \frac{1}{1 + e^{-a+b\Delta l_i}} \approx f(\Delta l_i) \cdot 1$. Таким образом, функция приобретает вид аналитической непрерывной формы функции Хевисайда. Неравенства аргумента функции относительно нуля и значения самой функции на указанных интервалах можно считать верными, если считать сигмоид единичной ступенчатой функцией в пределах заданной точности (рис. 2).

Численное моделирование

Численный эксперимент проведен для модели высоконагруженного параллельного тросового роботизированного комплекса в программной среде MATLAB с использованием встроенного инструмента численного решения дифференциальных уравнений *ode23t*. За основу взята модель роботизированного строительного комплекса Университета Иннополис, который представляет собой восьмитросовый параллельный робот (рис. 3, см. третью сторону обложки). Несущие тросы робота обозначены цифрами 1, 2, 3, 4. Регулировочные тросы робота обозначены цифрами 5, 6, 7, 8. Основная нагрузка на растяжение под действием силы тяжести в основном приходится на

несущие тросы. Нагрузка на растяжение и на сжатие приходится на регулировочные тросы. В компьютерной модели в начальный момент времени твердое тело, присоединенное к тросам, покоится на опоре, затем начинает движение в заданном направлении с заданной скоростью. Вязкоупругие свойства модели тросов определяют колебательный характер движения системы. Характеристики роботизированного комплекса приведены в таблице.

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) приведены результаты численного моделирования сил натяжения и функций активации для тросов 1, 4, 7, 8 в начале движения мобильной платформы.

На рис. 5 (см. третью сторону обложки) приведены результаты численного моделирования распределения нагрузок для восьми тросов в процессе движения платформы.

Выводы

В ходе проведенного исследования разработан метод, обеспечивающий включение конструктивной нелинейности тросовой системы в математическую модель с учетом возможности использования символьных вычислений в реализации компьютерной модели. Предложен способ решения проблемы включения математической модели тросов как односторонних связей в модели высоконагруженных тросовых роботов. Приведены обоснования для включения функций активации в систему уравнений динамики тросового робота.

С использованием разработанного метода и с учетом сопротивления реальных тросов только усилию на растяжение получено численное решение прямой задачи динамики высоконагруженного параллельного тросового робота с включением функций активации в систему дифференциальных уравнений модели динамики робота. Полученные результаты иллюстрируют целесообразность включения сигмоидальной функции активации

Характеристики высоконагруженного параллельного тросового роботизированного комплекса

Properties of high-loaded parallel cable-driven robotic complex

Число тросов	Диаметр стального троса	Масса рабочего инструмента	Масса полезной нагрузки	Скорость перемещения инструмента	Площадь рабочего пространства	Ограничение рабочего пространства по высоте
8	12 мм	500 кг	до 1500 кг	до 0,15 м/с	20 × 20 м	12 м

"трос—стержень—односторонняя связь" в состав дифференциальных уравнений модели, тросы в компьютерной модели работают на сопротивление растяжению и не работают на сопротивление сжатию.

Практическое применение разработанного метода используется в расчетах при проектировании роботизированного строительного комплекса Университета Иннополис, основой которого является высоконагруженный полноприводный параллельный тросовый робот.

Список литературы

1. Irvine H. M. Cable structures. The MIT Press, 1981. 259 p.
2. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити. М.: Наука, 1980. 240 с.
3. Светлицкий В. А. Механика гибких стержней и нитей. М.: Машиностроение, 1978. 222 с.
4. Feyrer K. Wire ropes. Tension, Endurance, Reliability. Springer-Verlag, 2007. 322 p.
5. Малиновский В. А. Стальные канаты. Одесса: Астропринт, 2001. 188 с.
6. Kaczmarczyk S., Ostachowicz W. Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 1: Mathematical model // Journal of Sound and Vibration. 2003. Iss. 262 (2). P. 219—244.
7. Kaczmarczyk S., Ostachowicz W. Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 2: Numerical simulation of the dynamic response // Journal of Sound and Vibration. 2003. Iss. 262 (2). P. 245—289.
8. Дукельский А. И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.: Машиностроение, 1966. 485 с.
9. Куйбида Г. Г. Кабельные краны. М.: Машиностроение, 1989. 288 с.
10. Kozak K., Zhou Q., Wang J. Static Analysis of Cable-Driven Manipulators with Non-Negligible Cable Mass. IEEE Transactions on Robotics. June 2006. Vol. 22, N. 3.
11. Merlet J. P. The kinematics of cable-driven parallel robots with sagging cables: preliminary results // 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2015. P. 1593—1598.
12. Merlet J. P. A generic numerical continuation scheme for solving the direct kinematics of cable-driven parallel robot with deformable cables // 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). 2016. P. 4337—4343.
13. Merlet J. P. Some properties of the Irvine cable model and their use for the kinematic analysis of cable-driven parallel robots. // Mechanism and Machine Theory. 2019. Vol. 135. P. 271—280.
14. Pott A. Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application. Springer, 2018.
15. Akhmetzyanov A., Rassbin M., Maloletov A., Fadeev M., Klimchik A. Deep Learning with Transfer Learning Method for Error Compensation of Cable-driven Robot // Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics. Vol. 1. ICINCO, 2020. P. 553—559.
16. Рабинович И. М. Вопросы теории статического расчета сооружений с односторонними связями. М.: Стройиздат, 1975. 144 с.
17. Перельмутер А. В., Сливкер В. И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Киев: Сталь, 2002. 600 с.
18. Качурин В. К. Теория висячих систем. Л.: Госстройиздат, 1962. 224 с.
19. Seidel M. Tensile Surface Structures. Ernst and Sohn, 2009. 229 p.
20. Meyers M. A., Chawla K. K. Mechanical Behavior of Materials. Cambridge University Press, 2009. 856 p.
21. Vanderveldt H. H., Chung B. S., Reader W. T. Some dynamic properties of axially loaded wire ropes // Experimental Mechanics. 1973. Vol. 13. P. 24—30.
22. Hamilton J. M. Vibration-Based Techniques for Measuring the Elastic Properties of Ropes and the Added Mass of Submerged Objects // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. 2000. Vol. 17. Iss. 5. P. 688—697.
23. Пупков К., Егупов Н. Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 1: "Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления". М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 656 с.
24. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / Пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 798 с.
25. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Горячая линия — Телеком, 2013. 384 с.
26. Zi B., Qian S. Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications. Springer, 2017. 299 p.

Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot

Ya. V. Kalinin, jkv83@mail.ru, E. A. Marchuk, e.marchuk@innopolis.ru,

Innopolis University, Innopolis, 420500, Russian Federation,

Volgograd State Technical University, Volgograd, 400005, Russian Federation

Corresponding author: Marchuk Eugene A., M. Sc., Department of Theoretical Mechanics, Volgograd State Technical University, 400005, Volgograd, Russian Federation, e-mail: flameduck88@gmail.com

Accepted on July 12, 2021

Abstract

The paper deals with a problem of modeling of the dynamics of a parallel cable-driven robot with the inclusion of structural nonlinearity of cables in a mathematical model. Mathematical model is implemented in a computer model with the possibility of using of symbolic calculations. Parallel cable robots as a type of robotics have been developing in the last two or three decades. The research in the theoretical field was being carried out and the mathematical model of the cable system was being refined with the spread of the practical use of cable robots. This is a non-trivial task to draw up a dynamic model of a cable-driven robot. Cable-driven robots are highly nonlinear systems, because of the main reason for

the nonlinearity is the properties of the cable system. As an element of a mechanical system, the cable or the wire rope is a unilateral constraint, since the cable works only for stretching, but not for compression. Thus, the cables are structurally nonlinear elements of the system. On the other hand, cables have the property of sagging under their own weight. Thus, the cables are geometrically nonlinear elements of the system. Under the condition of a payload mass that is utterly greater than the mass of each cable, the cables can be considered strained without sagging and geometric nonlinearity can be neglected. Since symbolic computations can be used in a computer model which implements a mathematical model of the dynamics of a robot, in such a way it must provide the possibility of symbolic computations with the condition of structural nonlinearity. The main aim of this work is to develop a method that ensures the inclusion of the structural nonlinearity of the cable system in the mathematical model. It is supposed to consider the possibility of implementation of the computer model with symbolic computations. The problem of including a mathematical model of cables as unilateral constraints in the model of highly loaded cable robots is considered. The justification for including the activation functions in a system of differential equations of dynamics of cable-driven robot is formulated. A model of wire ropes as unilateral constraints is represented via including the activation functions in a system of differential equations. With using of the proposed method, numerical solution of a problem of forward dynamics has been obtained for high-loaded parallel cable-driven robot.

Keywords: cable-driven robot, activation function, differential equations

For citation:

Kalinin Ya. V., Marchuk E. A. Specificity of Including of Structural Nonlinearity in Model of Dynamics of Cable-Driven Robot, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 547–552.

DOI: 10.17587/mau.22.547-552

References

1. **Irvine H. M.** Cable structures, The MIT Press, 1981, 259 p.
2. **Merkin D. R.** Introduction to the mechanics of a flexible thread, Moscow, Nauka, 1980, 240 p. (in Russian).
3. **Svetlitskij V. A.** Mechanics of flexible pins and threads, Moscow, Mashinostroenie, 1978, 222 p. (in Russian).
4. **Feyrer K.** Wire ropes. Tension, Endurance, Reliability, Springer-Verlag, 2007, 322 p.
5. **Malinovskij V. A.** Steel wire ropes, Odessa, Astroprint, 2001, 188 p. (in Russian).
6. **Kaczmarczyk S., Ostachowicz W.** Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 1: Mathematical model, *Journal of Sound and Vibration*, 2003, iss. 262 (2), pp. 219–244.
7. **Kaczmarczyk S., Ostachowicz W.** Transient vibration phenomena in deep mine hoisting cables. Part 2: Numerical simulation of the dynamic response, *Journal of Sound and Vibration*, 2003, iss. 262 (2), pp. 245–289.
8. **Dukelskij A. I.** Cable transport and cable cranes, Moscow, Mashinostroenie, 1966, 485 p. (in Russian).
9. **Kujbida G. G.** Cable Cranes, Moscow, Mashinostroenie, 1989, 288 p. (in Russian).
10. **Kozak K., Zhou Q., Wang J.** Static Analysis of Cable-Driven Manipulators with Non-Negligible Cable Mass, *IEEE Transactions on Robotics*, June 2006, vol. 22, no. 3.
11. **Merlet J. P.** The kinematics of cable-driven parallel robots with sagging cables: preliminary results, *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2015, pp. 1593–1598.
12. **Merlet J. P.** A generic numerical continuation scheme for solving the direct kinematics of cable-driven parallel robot with deformable cables, *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2016, pp. 4337–4343.
13. **Merlet J. P.** Some properties of the Irvine cable model and their use for the kinematic analysis of cable-driven parallel robots, *Mechanism and Machine Theory*, 2019, vol. 135, pp. 271–280.
14. **Pott A.** Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application, Springer, 2018.
15. **Akhmetzyanov A., Rassbin M., Maloletov A., Fadeev M., Klimchik A.** Deep Learning with Transfer Learning Method for Error Compensation of Cable-driven Robot, *Proceedings of the 17th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, vol. 1, ICINCO*, 2020, pp. 553–559.
16. **Rabinovich I. M.** On the issues of static analysis of constructions with unilateral constraints, Moscow, Stroyizdat, 1975, 144 p. (in Russian).
17. **Perelmuter A. V., Slivker V. I.** Computation models of constructions and possibility of their analysis, Kiev, Stal, 2002, 600 p. (in Russian).
18. **Kachurin V. K.** Theory of Tensile Structures, Leningrad, Gosstroyizdat, 1962, 224 p. (in Russian).
19. **Seidel M.** Tensile Surface Structures. Ernst and Sohn, 2009, 229 p.
20. **Meyers M. A., Chawla K. K.** Mechanical Behavior of Materials, Cambridge University Press, 2009, 856 p.
21. **Vanderveldt H. H., Chung B. S., Reader W. T.** Some dynamic properties of axially loaded wire ropes, *Experimental Mechanics*, 1973, vol. 13, pp. 24–30.
22. **Hamilton J. M.** Vibration-Based Techniques for Measuring the Elastic Properties of Ropes and the Added Mass of Submerged Objects, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, vol. 17, iss. 5, pp. 688–697.
23. **Pupkov K. A., Egupov N. D.** Methods of classic and modern control theory. Vol. 1. Mathematical models, dynamic properties, and analysis of control systems, Moscow, Publishing house of MGTU im. N. E. Bauman, 2004, 656 p. (in Russian).
24. **Piegat A.** Fuzzy modeling and control, Physica-Verlag Heidelberg, 2001, 728 c.
25. **Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L.** Neural networks, genetic algorithms, and fuzzy systems, Moscow, Goryachaya liniya—Telekom, 2013, 384 p. (in Russian).
26. **Zi B., Qian S.** Design, Analysis and Control of Cable-Suspended Parallel Robots and Its Applications, Springer, 2017, 299 p.

О. Н. Корсун^{1,2}, д-р техн. наук, проф., marmotto@rambler.ru,
М. Х. Ом², канд. техн. наук, докторант, mounhtangom50@gmail.com,
Ч. З. Латт², аспирант, pinkesive@gmail.com,

¹ Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, г. Москва,

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Определение проекций скорости ветра на основе измерений воздушной скорости, углов атаки и скольжения*

Рассматривается задача оценивания проекций скорости ветра в полете. Предложенный метод позволяет получить оценки для трех проекций скорости ветра в нормальной земной системе координат с использованием данных спутниковой навигационной системы, а также бортовых аэрометрических измерений воздушной скорости, углов атаки и скольжения. Основная идея, положенная в основу метода, состоит в том, что спутниковые измерения трех проекций скорости летательного аппарата относительно земной системы координат являются весьма точными (погрешности обычно не превышают 0,2 м/с). Это позволяет использовать спутниковые измерения скоростей в качестве своего рода эталона, подобно тому, как в практической метрологии для оценивания погрешностей средств измерений их сравнивают с эталоном, т. е. существенно более точным средством измерения. Чтобы реализовать такой подход не в метрологической лаборатории, а на борту летательного аппарата, предлагается использовать известные из динамики полета соотношения между проекциями скорости в земной и связанной системах координат, углами атаки и скольжения и скоростью ветра. Затем три проекции скорости ветра назначаются неизвестными параметрами, для нахождения которых применяется параметрическая идентификация. Предполагается, что на обрабатываемом участке полета ветер имеет постоянную скорость и направление.

Показатели точности предложенного алгоритма оценивались по данным, полученным на пилотажном стенде современного учебно-тренировочного самолета. В процессе стендового моделирования воспроизводились случайные погрешности измерений на уровнях, соответствующих летному эксперименту. Исследовалось также влияние вида маневров на точность идентификации трех проекций скорости ветра.

Показано, что для маневров типа "бочка", "дачи" по тангажу, "змейка" погрешности оценивания горизонтальных составляющих скорости ветра в основном не превышают 5 %, вертикальной составляющей — 10 % при длительностях скольжения интервала обработки 0,5 и 1,0 с, что позволяет не только оценивать постоянную скорость ветра, но и отслеживать ее изменение.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, полетный маневр, скорость ветра, угол атаки, угол скольжения, воздушная скорость

Введение

Измерение параметров движения самолета и параметров состояния атмосферы является важной задачей на этапе летных испытаний и в процессе эксплуатации воздушных судов [1, 2]. В общем случае результаты бортовых измерений обладают значимыми систематическими погрешностями, для оценивания которых целесообразно использовать методы параметрической идентификации динамических систем [3–6], которые получили развитие при решении задачи оценивания аэродинамических коэффициентов летательных ап-

паратов по полетным данным [7–11] в целях обеспечения точности моделирования и синтеза управления [12–14]. Применительно к погрешностям бортовых измерений такой идентификационный подход предлагался в работах [3, 4, 15], а использование для оценивания систематических погрешностей данных спутниковых навигационных систем (СНС) — в статьях [15–17]. В работах [18, 19] указанные подходы используются для определения скорости ветра на участке полета на основе комплексирования спутниковых и барометрических измерений скорости. При этом в статье [18] для получения оценок скорости ветра необходимо выполнить прямолинейное движение с нулевым скольжением, а в работе [19] рассмотрены тестовые маневры различного вида.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), проект 20-08-00449.

Предложенный в данной статье метод обеспечивает оценивание трех проекций скорости ветра в нормальной земной системе координат с использованием спутниковых измерений трех проекций скорости самолета, а также аэрометрических бортовых измерений истинной воздушной скорости, углов атаки и скольжения. Расширение вектора измерений повышает точность оценок и позволяет уменьшить длительность интервала обработки.

Описание алгоритма оценивания скорости ветра

Предполагается, что ветер имеет постоянную скорость и направление на обрабатываемом участке полета. Это означает, что для этого временного интервала значения проекции скорости ветра на оси нормальной земной системы координат постоянны. Эти проекции найдем методом параметрической идентификации, для чего необходимо определить модели объекта и наблюдений. Сформируем модель объекта. Уравнения для проекций воздушной скорости самолета на оси нормальной земной системы координат [20] определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} V_{xg_a}(t_i) &= V_{xg_СНС}(t_i) - W_{xg}; \\ V_{yg_a}(t_i) &= V_{yg_СНС}(t_i) - W_{yg}; \\ V_{zg_a}(t_i) &= V_{zg_СНС}(t_i) - W_{zg}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $V_{xg_СНС}(t_i)$, $V_{yg_СНС}(t_i)$, $V_{zg_СНС}(t_i)$ — измеренные СНС значения проекций скорости ЛА на оси нормальной земной системы; W_{xg}, W_{yg}, W_{zg} — подлежащие идентификации неизвестные значения проекций скорости ветра на оси нормальной земной системы.

Очевидно, что модуль вектора воздушной скорости равен

$$V_a(t_i) = \sqrt{V_{xg_a}^2(t_i) + V_{yg_a}^2(t_i) + V_{zg_a}^2(t_i)}. \quad (2)$$

Для перехода к связанным осям используем соответствующую матрицу направляющих косинусов, зависящую от углов тангажа, крена и рыскания, т. е. углов ориентации связанной системы координат [12]:

$$\begin{bmatrix} V_{x_a} \\ V_{y_a} \\ V_{z_a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & \sin \vartheta & -\sin \psi \cos \vartheta \\ \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma & \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{xg_a} \\ V_{yg_a} \\ V_{zg_a} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В ходе вычислений значения углов ориентации следует брать согласно выходным сигналам бортового навигационного комплекса. Используя проекции (3) воздушной скорости на связанные оси, запишем формулы для значений углов атаки и скольжения:

$$\begin{aligned} \alpha_u(t_i) &= -\arctg\left(\frac{V_{y_a}(t_i)}{V_{x_a}(t_i)}\right), \\ \beta_u(t_i) &= -\arcsin\left(\frac{V_{z_a}(t_i)}{V_a(t_i)}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\alpha_u(t_i), \beta_u(t_i)$ — значения углов атаки и скольжения.

Итак, модель объекта определяется уравнениями (1)–(4). Уравнения (4) определяют углы атаки и скольжения через проекции скорости самолета относительно воздуха. Установленные на борту датчики аэродинамических углов должны измерять именно эти величины, однако в общем случае датчики имеют систематические погрешности мультипликативного и аддитивного типов. Измерения истинной воздушной скорости также могут иметь, по меньшей мере, аддитивную погрешность. С учетом этих погрешностей модель наблюдений принимает вид

$$\begin{aligned} z_1(t_i) &= V_a(t_i) + C_V + \xi_V(t_i); \\ z_2(t_i) &= K_\alpha \alpha_u(t_i) + C_\alpha + \xi_\alpha(t_i); \\ z_3(t_i) &= K_\beta \beta_u(t_i) + C_\beta + \xi_\beta(t_i), \end{aligned} \quad (5)$$

где C_V, C_α, C_β — аддитивные погрешности аэрометрических измерительных каналов воздушной скорости, углов атаки и скольжения; K_α, K_β — коэффициенты мультипликативных погрешностей измерения углов атаки и скольжения; $\xi_V(t_i), \xi_\alpha(t_i), \xi_\beta(t_i)$ — случайные погрешности аэрометрических измерений, которые традиционно считают случайными независимыми величинами, имеющими нормальное распределение с нулевыми математическими ожиданиями и известной ковариационной матрицей.

Оценки систематических погрешностей определяются в ходе отдельных испытаний [1, 2] или включаются в вектор идентифицируемых параметров [8]. Это усложняет задачу

идентификации и предъявляет более жесткие требования к виду маневра и длительности участка обработки [8].

В настоящей работе примем, что оценки указанных систематических погрешностей получены ранее. Тогда вектор идентифицируемых параметров содержит только три проекции скорости ветра на оси земной системы координат W_{xg}, W_{yg}, W_{zg} . Отметим, что по сравнению с подходами к оцениванию скорости ветра, предложенными в работах [10, 11], рассмотренный алгоритм предусматривает увеличение размерности вектора наблюдений, т. е. увеличение количества информации, привлекаемой для идентификации проекций скорости ветра. Это позволяет значительно уменьшить длительность интервала обработки.

Метод параметрической идентификации

Задача оценки скорости ветра может быть решена с использованием алгоритма оценки максимального правдоподобия [3]. В общем виде векторная модель объекта и модель наблюдения представлены следующим образом:

$$y(t_i) = f(y(t_{i-1}), a, u(t_i)); \quad (6)$$

$$z(t_i) = h(y(t_i), a, u(t_i)) + \eta(t_i), \quad (7)$$

где $y(t)$, $u(t)$ — векторы выходных и входных сигналов объекта, размерности n и m соответственно; $z(t_i)$ — вектор наблюдений размерности r ; a — вектор неизвестных параметров, которые необходимо оценить; $\eta(t_i)$ — случайные погрешности, относительно которых принимаются допущения нормальности, независимости, нулевых математических ожиданий и наличия информации о ковариационной матрице $R(t)$. Принимаем также допущения о том, что управление $u(t)$ и начальные условия для вектора состояния $y(t_0)$ заданы.

При указанных условиях критерий максимума правдоподобия обеспечивает получение оценок, обладающих статистическими свойствами эффективности и несмещенности. Минимизированный функционал метода максимального правдоподобия выражается в следующем виде:

$$J(a) = \sum_{i=1}^N ((z(t_i) - h(y(t_i), a, u(t_i)))^T \times R^{-1}(t_i) ((z(t_i) - h(y(t_i), a, u(t_i))))). \quad (8)$$

Нетрудно видеть, что (8) является функционалом метода наименьших квадратов с матрицей весовых коэффициентов $R(t_i)^{-1}$, что обусловлено принятыми допущениями о нормальности шумов.

Для минимизации этого функционала применяется модифицированный метод Ньютона [3], который позволяет найти оценки вектора идентифицируемых параметров.

Исходные данные для тестирования предложенного алгоритма были получены путем моделирования на полунатурном стенде, оснащем органами управления. Данный вариант имеет преимущество по сравнению с чисто математическим моделированием, поскольку наличие человека-оператора придает смоделированным полетным данным большую степень достоверности. В стендовом эксперименте моделировался гипотетический учебно-тренировочный самолет.

Определение проекций скорости ветра

Возможности данного алгоритма исследовались по данным стендового моделирования. Случайные погрешности измерений моделировались в каналах углов ориентации, воздушной скорости, углов атаки, скольжения, а также трех проекций скорости полета, измеряемых СНС. Дисперсии шумов при этом задавались на средних уровнях, имеющих место в летном эксперименте. Основное внимание было уделено оцениванию влияния вида маневра и длительности скользящего интервала. Рассматривались такие маневры, как "дачи" по тангажу, "бочка", "змейка" и "змейка с повышенной вертикальной составляющей", т. е. с дополнительным движением в канале тангажа. Длительности маневров обычно составляли 30...50 с. В данном варианте алгоритма оказалось возможным существенно уменьшить длительность скользящего интервала. В работе мы исследовали интервалы длительностью 0,5 и 1,0 с. Для определения влияния параметров движения начало скользящего интервала сдвигалось последовательно по всему участку обработки с шагом 1 с.

Маневр "бочка". Значения основных параметров полета, а именно истинной воздушной скорости, углов тангажа, крена, угла атаки и угла рыскания, показаны на рис. 1.

Оценки трех проекций скорости для скользящего интервала 0,5 с показаны на рис. 2. Для

значений длительности скользящего окна 1,0 с полученные результаты аналогичны, различия составляют 2...5 %.

Рис. 2 показывает, что погрешности оценивания горизонтальных проекций в основном не превышают $\pm 5\%$ на всем участке выполнения маневра, а погрешности оценивания вертикальной составляющей $\pm 10\%$, за исключением отдельных точек, соответствующих началу и концу энергичного маневра по крену (12 с и 23 с).

Отметим, что рассмотренные длительности скользящего интервала, составляющие 0,5 с и

1 с, весьма малы, что позволяет оперативно отслеживать изменение ветра в течение полета.

Режим "дачи" в канале тангажа. Дачи выполнялись "от себя" и "на себя" с длительностью 1,5...2 с.

Для этого элементарного маневра получены аналогичные результаты: погрешности оценивания горизонтальных проекций не превышают $\pm 5\%$, погрешности оценивания вертикальной составляющей $\pm 10\%$, различия для значений длительности скользящего окна 0,5 с и 1,0 с составляют 2...5 %.

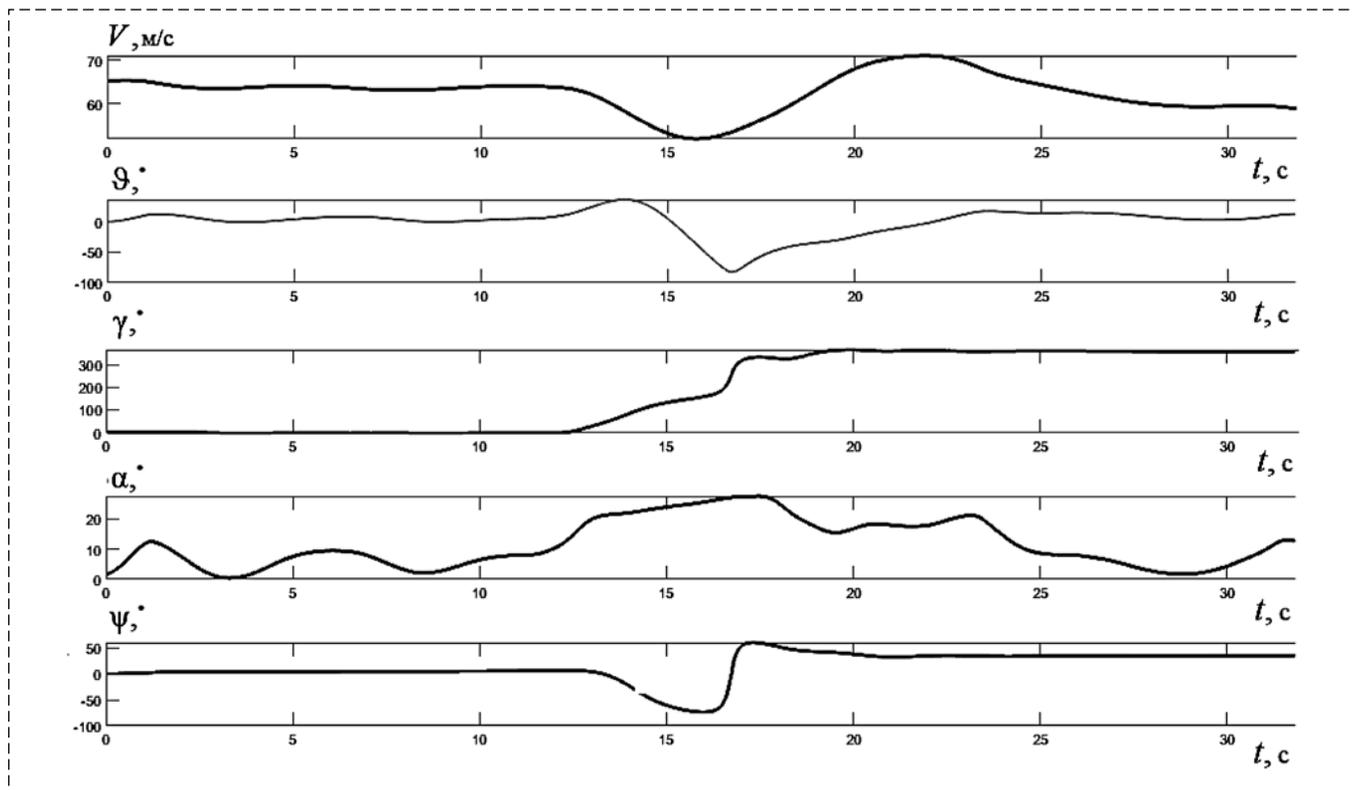


Рис. 1. Значения основных параметров полета для маневра "бочка", полное время маневра 32 с

Fig. 1. Values of the main flight parameters for the "barrel" maneuver, total maneuver time 32 s

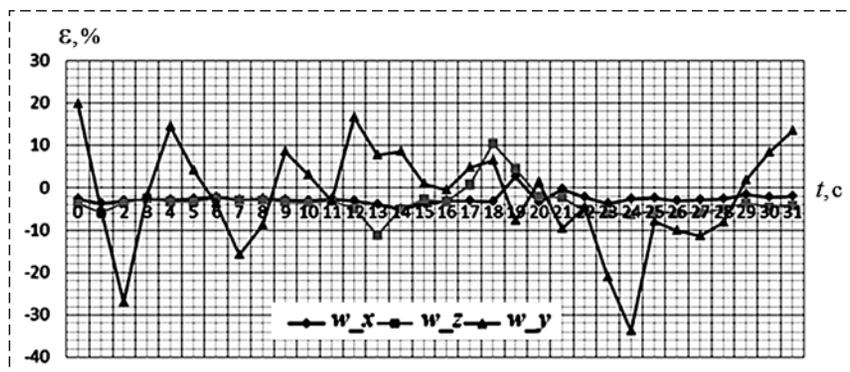


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности оценки от времени начала обработки, скользящий интервал 0,5 с, шаг 1 с

Fig. 2. Dependence of the relative error of estimates on the starting time of the processing, sliding interval is 0,5 s, step 1 s

Маневр "Змейка". Параметры движения самолета для маневра "Змейка" даны на рис. 3, результаты для длительностей скользящего окна 0,5 с и 1 с показаны на рис. 4, 5.

Как видно, погрешности оценивания как горизонтальных, так и вертикальной проекций в основном не превышают 5 % на всем участке выполнения маневра, за исключением отдельных коротких участков, на которых погрешности оценивания вертикальной

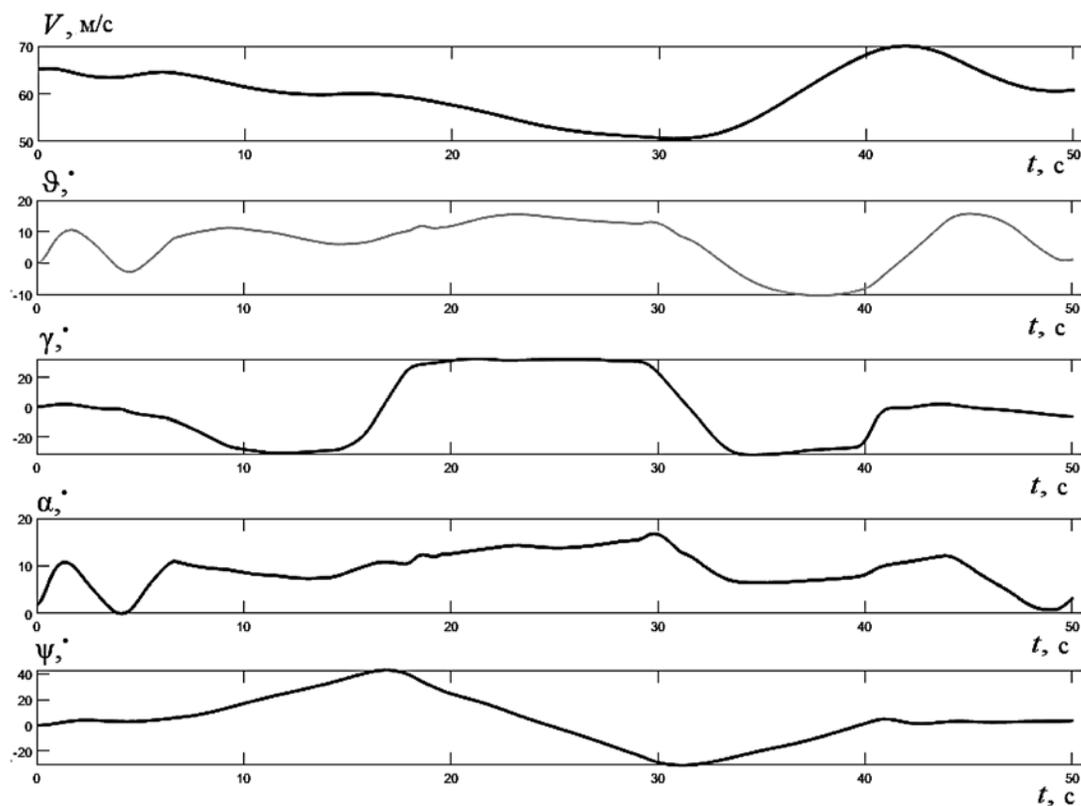


Рис. 3. Значения основных параметров полета для маневра "Змейка", полное время маневра 50 с
 Fig. 3. Values of the main flight parameters for the "Snake" maneuver, total maneuver time 50 s

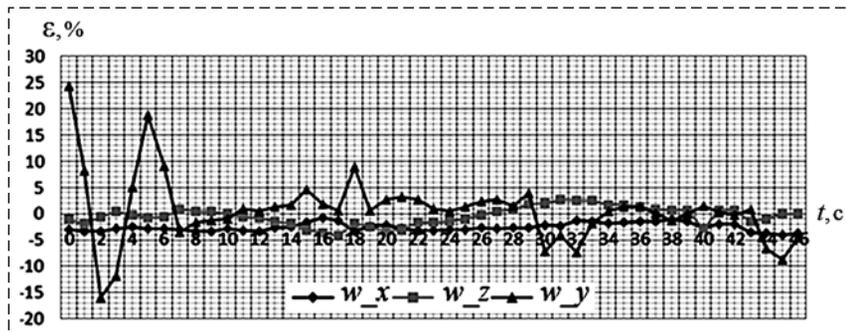


Рис. 4. Зависимость относительной погрешности оценки от времени начала обработки, скользящий интервал 0,5 с, шаг 1 с
 Fig. 4. Dependence of the relative error of estimates on the starting time of the processing, sliding interval is 0,5 s, step 1 s

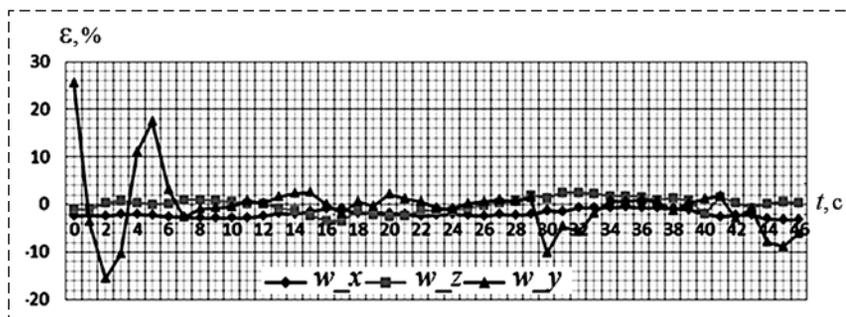


Рис. 5. Зависимость относительной погрешности оценки от времени начала обработки, скользящий интервал 1,0 с, шаг 1 с
 Fig. 5. Dependence of the relative error of estimates on the starting time of the processing, sliding interval is 1,0 s, step 1 s

составляющей достигают $\pm 10\%$. Сравнение графиков для значений длительности скользящего окна 0,5 с и 1,0 с показывает несущественные различия, порядка 2...5%. Сравнение графиков погрешностей на рис. 4, 5 с рис. 3, на котором показано изменение сигналов в процессе выполнения маневра, показывает, что рост погрешностей по вертикальной составляющей имеет место в моменты энергичного маневрирования, как и в предыдущих случаях. Таким образом, можно предположить, что наиболее благоприятным для оценивания режимом полета является горизонтальный полет с малыми возмущениями.

Маневр "Змейка с вертикальной составляющей". Характер движения для маневра "Змейка с вертикальной составляющей" представлен на рис. 6, результаты для скользящего окна длитель-

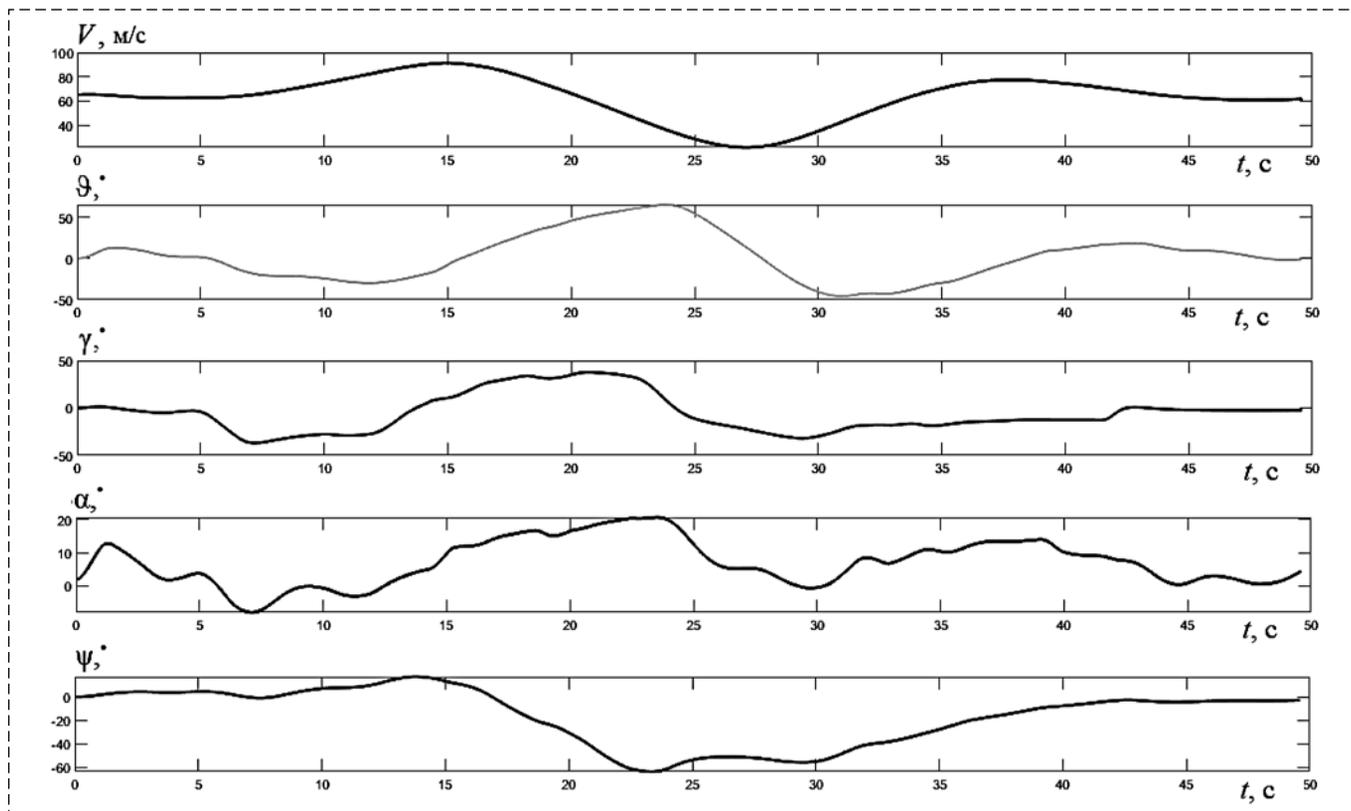


Рис. 6. Значения основных параметров полета для маневра "Змейка с вертикальной составляющей", полное время маневра 50 с
 Fig. 6. Values of the main flight parameters for the "Snake with a vertical component" maneuver, total maneuver time 50 s

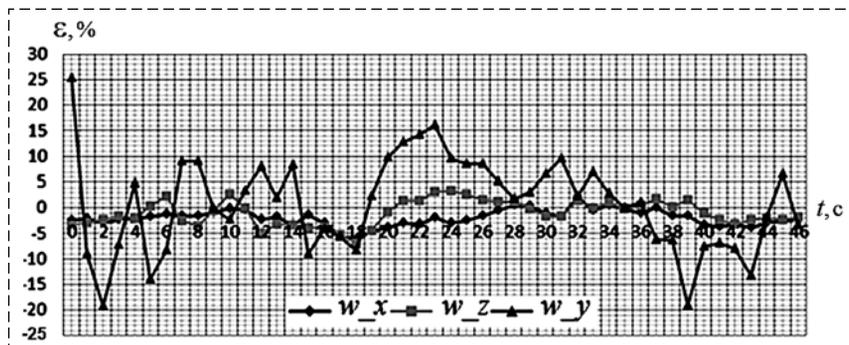


Рис. 7. Зависимость относительной погрешности оценки от времени начала обработки, скользящий интервал 1,0 с, шаг 1 с
 Fig. 7. Dependence of the relative error of estimates on the starting time of the processing, sliding interval is 1,0 s, step 1 s

ностью 1 с показаны на рис. 7, для длительности 0,5 с отклоня 2...5 %, как и ранее.

Как видим, погрешности оценивания горизонтальных проекций в основном не превышают 5 % на всем участке выполнения маневра, а погрешности оценивания вертикальной составляющей ± 10 %, за исключением отдельных точек. Сравнение графиков погрешностей на рис. 7 с рис. 6, на котором показано изменение сигналов в процессе выполнения маневра, показывает, что рост погрешностей по вертикальной составляющей имеет место в моменты энергичного

маневрирования, как и в предыдущем случае. Итак, подтверждается вывод, что благоприятным для оценивания скорости ветра является полет, близкий к прямолинейному с малыми возмущениями.

Заключение

По данным моделирования на пилотажном стенде выполнено исследование точностных характеристик алгоритма оценивания трех составляющих скорости ветра на

основе измерений трех проекций скорости спутниковой навигационной системы, а также аэрометрических измерений истинной воздушной скорости, углов атаки и скольжения

Показано, что для маневров типа "бочка", "дачи" по тангажу, "змейка" погрешности оценивания горизонтальных составляющих скорости ветра в основном не превышают 5 %, вертикальной составляющей 10 % для длительностей скользящего интервала обработки 0,5 и 1,0 с, что позволяет не только оценивать постоянную скорость ветра, но и отслеживать ее изменения.

Список литературы

1. Васильченко К. К., Леонов В. А., Пашковский И. М., Поплавский Б. К. Летные испытания самолетов. М.: Машиностроение, 1996. 745 с.
2. Августов Л. И., Бабиченко А. В. и др. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. М.: Научтехлитиздат, 2015. 592 с.
3. Klein V., Morelli E. Aircraft System Identification. Theory and Practice. Reston: AIAA, 2006. 484 p.
4. Korsun O. N., Poplavsky B. K. Approaches for flight tests aircraft parameter identification // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014. 2014. P. 02–10.
5. Jategaonkar R. V. Flight vehicle system identification: A time domain methodology. Reston: AIAA, 2006. 534 p.
6. Овчаренко В. Н. Аэродинамические характеристики летательных аппаратов: Идентификация по полетным данным. М.: ЛЕНАНД, 2019. 236 с.
7. Chowdhary G., Jategaonkar R. Aerodynamic parameter estimation from flight data applying extended and unscented Kalman filter // Aerospace Science and Technology. 2010. Vol. 14. P. 106–117.
8. Brunton S. L., Dawson S. T. M., Rowley C. W. State-space model identification and feedback control of unsteady aerodynamic forces // Journal of Fluids and Structures. 2014. Vol. 50. P. 253–270.
9. Wang Y., Dong J., Liu X., Zhang L. Identification and standardization of maneuvers based upon operational flight data // Chinese Journal of Aeronautics. 2015. Vol. 28, N. 1. P. 133–140.
10. Song Y., Song B., Seanor B. et al. On-line aircraft parameter identification using Fourier transform regression with an application to F/A-18 HARV flight data // KSME International Journal. 2002. Vol. 16, N. 3. P. 327–337.
11. Boubertakh H. Knowledge-based ant colony optimization method to design fuzzy proportional integral derivative controllers // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2017. Vol. 56, Iss. 4. P. 681–700.
12. Luchtenburg D. M., Rowley C. M., Lohry M. W., Martinelli L., Stengel R. F. Unsteady high-angle-of-attack aerodynamic models of a generic jet transport // Journal of Aircraft. 2015. Vol. 52, N. 3. P. 890–895.
13. Wang Q., He K. F., Qian W. Q., Zhang T. J., Cheng Y. Q., Wu K. Y. Unsteady aerodynamics modeling for flight dynamics application // Acta Mechanica Sinica. 2012. Vol. 28, N. 1. P. 14–23.
14. Schutte A., Einarsson G., Raichle A., Schoning B., Monnich W., Forkert T. Numerical simulation of maneuvering aircraft by aerodynamic, flight mechanics, and structural mechanics coupling // J. Aircraft. 2009. Vol. 46, N. 1. P. 53–64.
15. Kanyshev A. V., Korsun O. N., Ovcharenko V. N., Stulovskii A. V. Identification of aerodynamic coefficients of longitudinal movement and error estimates for onboard measurements of supercritical angles of attack // Journal of Computer and System Sciences International. 2018. Vol. 57, N. 3. P. 374–389.
16. Korsun O. N., Nikolaev S. V., Pushkov S. G. An algorithm for estimating systematic measurement errors for air velocity, angle of attack, and sliding angle in flight testing // Journal of Computer and Systems Sciences International. 2016. Vol. 55, N. 3. P. 446–457.
17. Wagner J. F., Wieneke T. Integrating satellite and inertial navigation conventional and new fusion approaches // Control Engineering Practice. 2003. Vol. 11(5). P. 483–598.
18. Пушков С. Г., Ловицкий Л. Л., Корсун О. Н. Методы определения скорости ветра при проведении летных испытаний авиационной техники с применением спутниковых навигационных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 9. С. 65–70.
19. Kyaw Zin Latt, Moug Htang Om. Development of wind velocity estimation method using the airspeed // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25, № 2. С. 152–159.
20. Динамика полета: Учебник для студентов высших учебных заведений / А. В. Ефремов, В. Ф. Захарченко, В. Н. Овчаренко и др.; Под ред. Г. С. Бюшгенса. М.: Машиностроение, 2017. 776 с.

Determination of Wind Velocity Projections Taking into Account Measurements of Airspeed, Angles of Attack and Sideslip

O. N. Korsun^{1,2}, marmotto@rambler.ru, M. H. Om², moughtangom50@gmail.com,
K. Z. Latt², pinkesive@gmail.com,

¹ State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125319, Russian Federation,

² Moscow Aviation Institute (NRU), Moscow, 125993, Russian Federation

Corresponding author: Korsun Oleg N., D. Sc., Professor, Head of Laboratories,
State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, 125319, Russian Federation,
e-mail: marmotto@rambler.ru

Accepted on July 12, 2021

Abstract

The paper deals with the problem of estimating the projections of the wind velocity in flight. The proposed method allows to obtain estimates for three projections of wind speed in the normal Earth coordinate system using data from the satellite navigation system, as well as on-board aerometric measurements of airspeed, angles of attack and glide. The main idea underlying the method is that satellite measurements of three aircraft velocity projections relative to the Earth's coordinate system are very accurate (errors usually do not exceed 0.2 m/s). This makes it possible to use satellite velocity measurements as a kind of reference, just as in practical metrology, in order to assess the errors of measurement tools, they are compared with a standard, that is, a significantly more accurate measurement tool. In order to implement this approach not in a metrological laboratory, but on board an aircraft, it is proposed to use the relationships known from the flight dynamics between the velocity projections in the Earth's and associated coordinate systems, the angles of attack and glide, and the wind speed. Then, the three wind speed projections are assigned unknown parameters, which are found using parameter identification. It is assumed that the wind has a constant speed and direction in the processed section of the flight. The accuracy characteristics of the proposed algorithm were evaluated based on the data obtained on the flight

simulator of a modern training aircraft. In the course of simulation, random measurement errors were generated at the levels corresponding to the flight experiment. The influence of the type of maneuvers on the accuracy the three wind speed projections estimates was also studied. It is shown that for all considered maneuvers, that is "barrel", "snake", stepwise inputs, the errors in estimating the horizontal components of wind speed generally do not exceed 5 %, the vertical component 10 %, with the duration of the sliding processing interval of 0.5 and 1.0 s, which allows not only to estimate the constant wind speed, but also to track its change.

Keywords: parametric identification, flight maneuver, wind speed, angle of attack, glide angle, airspeed

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project 20-08-00449.

For citation:

Korsun O. N., Om M. H., Latt K. Z. Determination of Wind Velocity Projections Taking into Account Measurements of Airspeed, Angles of Attack and Sideslip, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 10, pp. 553–560.

DOI: 10.17587/mau.22.553-560

References

1. Vasil'chenko K. K., Leonov V. A., Pashkovskij I. M., Poplavskij B. K. Aircraft flight tests, Moscow, Mashinostroenie, 1996, 745 p.
2. Avgustov L. I., Babichenko A. V. et al. Aircraft navigation in near Earth space, Moscow, Nauchtekhlitizdatp 2015, 592 p. (in Russian)
3. Klein V., Morelli E. Aircraft System Identification. Theory and Practice, Reston, AIAA, 2006, 484 p.
4. Korsun O. N., Poplavsky B. K. Approaches for flight tests aircraft parameter identification, *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014*, 2014, pp. 02–10.
5. Jategaonkar R. V. Flight vehicle system identification: A time domain methodology, Reston, AIAA, 2006, 534 p.
6. Ovcharenko V. N. Aircraft aerodynamic parameters: flight data identification, Moscow, LENAND, 2019, 236 p.
7. Chowdhary G., Jategaonkar R. Aerodynamic parameter estimation from flight data applying extended and unscented Kalman filter, *Aerospace Science and Technology*, 2010, vol. 14, pp. 106–117.
8. Brunton S. L., Dawson S. T. M., Rowley C. W. State-space model identification and feedback control of unsteady aerodynamic forces, *Journal of Fluids and Structures*, 2014, vol. 50, pp. 253–270.
9. Wang Y., Dong J., Liu X., Zhang L. Identification and standardization of maneuvers based upon operational flight data, *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, vol. 28, no. 1, pp. 133–140.
10. Song Y., Song B., Seanor B. et al. On-line aircraft parameter identification using Fourier transform regression with an application to F/A-18 HARV flight data, *KSME International Journal*, 2002, vol. 16, no. 3, pp. 327–337.
11. Boubertakh H. Knowledge-based ant colony optimization method to design fuzzy proportional integral derivative controllers // *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2017, vol. 56, iss. 4, pp. 681–700.
12. Luchtenburg D. M., Rowley C. M., Lohry M. W., Martinelli L., Stengel R. F. Unsteady high-angle-of-attack aerodynamic models of a generic jet transport, *Journal of Aircraft*, 2015, vol. 52, no. 3, pp. 890–895.
13. Wang Q., He K. F., Qian W. Q., Zhang T. J., Cheng Y. Q., Wu K. Y. Unsteady aerodynamics modeling for flight dynamics application, *Acta Mechanica Sinica*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 14–23.
14. Schutte A., Einarsson G., Raichle A., Schoning B., Monnich W., Forkert T. Numerical simulation of maneuvering aircraft by aerodynamic, flight mechanics, and structural mechanics coupling, *J. Aircraft*, 2009, vol. 46, no. 1, pp. 53–64.
15. Kanyshov A. V., Korsun O. N., Ovcharenko V. N., Stulovskii A. V. Identification of aerodynamic coefficients of longitudinal movement and error estimates for onboard measurements of supercritical angles of attack, *Journal of Computer and System Science International*, 2018, vol. 57, no. 3, pp. 374–389.
16. Korsun O. N., Nikolaev S. V., Pushkov S. G. An algorithm for estimating systematic measurement errors for air velocity, angle of attack, and sliding angle in flight testing, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2016, vol. 55, no. 3, pp. 446–457.
17. Wagner J. F., Wieneke T. Integrating satellite and inertial navigation conventional and new fusion approaches, *Control Engineering Practice*, 2003, vol. 11, no. 5, pp. 483–598.
18. Pushkov S. G., Lovitsky L. L., Korsun O. N. Wind speed determination methods in flight tests using satellite navigation systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 9, pp. 65–70 (in Russian).
19. Kyaw Zin Latt, Moug Htang Om. Development of wind velocity estimation method using the airspeed, *Vestnik Moskovskogo aviacionnogo institute*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 152–159.
20. Efremov A. V., Zaharchenko V. F., Ovcharenko V. N. et al. *Dinamika poleta: Dynamics of Flight*, Moscow, Mashinostroenie, 2017, 776 p. (in Russian).

Издательство "НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ"

107076, Москва, Матросская тишина, 23с2

Телефон редакции журнала: +7(916) 392 21 67

Технический редактор Е. В. Конова. Корректор М. Ю. Безменова.

Сдано в набор 27.07.2021. Подписано в печать 07.09.2021. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1021. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Авансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Авансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru