

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 17

2016

№ 10

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:

CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN-HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
КАЛЯЕВ И. А., чл.-корр. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕНЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:

ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:

ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:

БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:

АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ Н. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс. н., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:

ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

- Оморов Т. Т., Такырбашев Б. К.** Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением 651
- Колесников А. А., Колесников Ал. А., Кузьменко А. А.** Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления 657

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

- Алисейчик А. П., Орлов И. А., Колесниченко Е. Ю., Павловский В. Е., Павловский В. В., Платонов А. К.** Реабилитационный экзоскелет БиоМех: модели, управление, конструкция, эксперименты 670

ПРИКЛАДНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Аракчеев П. В., Безделов В. Л., Бурый Е. В.** Определение параметров релейного регулятора системы термостабилизации оптико-электронной аппаратуры, используемой при пониженных температурах окружающей среды 678
- Сидоров И. С., Лысов В. Е.** Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-следающего электропривода на динамические показатели качества управления 685
- Андрянов А. И., Михальцов Д. Ю.** Экспериментальное исследование нелинейной динамики импульсных преобразователей напряжения с системой управления на основе метода направления на цель 690

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

- Маркелов В. В., Шукалов А. В., Костишин М. О., Жаринов И. О., Нечаев В. А.** Алгоритм расчета навигационных параметров полета летательного аппарата по маршрутам зональной навигации 697
- Колисниченко А. В., Федунев Б. Е.** Бортовая интеллектуальная информационная система "Ситуационная осведомленность экипажа вертолета" 703
- Большаков А. А., Кулик А. А., Скрипаль Е. Н., Сергушов И. В.** Разработка системы управления безопасностью полета вертолета 708

ОБРАЗОВАНИЕ В ОБЛАСТИ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

- Лопота А. В.** Робототехника и образование в условиях перехода к высокотехнологичному обществу 716

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; журнал включен в систему Российского индекса научного цитирования

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

MECHATRONICS, AUTOMATION, CONTROL



MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIIYA, UPRAVLENIE

Published since 2000

ISSN 1684-6427

DOI 10.17587/issn.1684-6427

Editorial Council:

ALIEV T. A., prof., Azerbaijan, Baku
 ANSHAKOV G. P., Russia, Samara
 BOLOTNIK N. N., Russia, Moscow
 CHENTSOV A. G., Russia, Ekaterinburg
 CHERNOUSKO F. L., Russia, Moscow
 CHYI-YEU LIN, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 FEDOROV I. B., Russia, Moscow
 GROUMPOS P. P., prof., Greece, Patras
 JEN-HWA GUO, PhD, Prof., Taiwan, Taipei
 KALYAEV I. A., Russia, Taganrog
 KATALINIC B., PhD, Prof., Austria, Vienna
 KRASNEVSKIY L. G., Belarus, Minsk
 KUZNETSOV N. A., Russia, Moscow
 LEONOV G. A., Russia, S.-Peterburg
 MATVEENKO A. M., Russia, Moscow
 MIKRIN E. A., Russia, Moscow
 PESHEKHONOV V. G., Russia, S.-Peterburg
 REZCHIKOV A. F., Russia, Saratov
 SCHERBATYUK A. F., Russia, Vladivostok
 SEBRYAKOV G. G., Russia, Moscow
 SIGOV A. S., Russia, Moscow
 SOJFER V. A., Russia, Samara
 SOLOMENTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVJEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S.N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg

Editor-in-Chief:

FILIMONOV N. B., Russia, Moscow

Deputy Editor-in-Chief:

PODURAEV Yu. V., Russia, Moscow
 PUTOV V. V., Russia, S.-Peterburg
 YUSCHENKO A. S., Russia, Moscow

Responsible Secretary:

BEZMEANOVA M. Yu., Russia, Moscow

Editorial Board:

ALEXANDROV V. V., Russia, Moscow
 ANTONOV B. I., Russia, Moscow
 ARSHANSKY M. M., Russia, Tver
 BUKOV V. N., Russia, Zhukovsky
 ERMOLOV I. L., Russia, Moscow
 FILARETOV V. F., Russia, Vladivostok
 FRADKOV A. L., Russia, S.-Peterburg
 FURSOV V. A., Russia, Samara
 GRADETSKY V. G., Russia, Moscow
 ILYASOV B. G., Russia, Ufa
 IVCHENKO V. D., Russia, Moscow
 KOLOSOV O. S., Russia, Moscow
 KOROSTELEV V. F., Russia, Vladimir
 LEBEDEV G. N., Russia, Moscow
 LOKHIN V. M., Russia, Moscow
 PAVLOVSKY V. E., Russia, Moscow
 PROKHOROV N. L., Russia, Moscow
 PSHIKHOPOV V. Kh., Russia, S.-Peterburg
 RAPOPORT E. Ya., Russia, Samara
 SERGEEV S. F., Russia, S.-Peterburg
 VITTIKH V. A., Russia, Samara
 YUREVICH E. I., Russia, S.-Peterburg

Editorial Staff:

GRIGORIN-RYABOVA E.V., Russia, Moscow

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

METHODS OF THE THEORY OF AUTOMATIC CONTROL

- Omorov T. T., Takyrbashev B. K.** Identification of the State of the Distributive Electrical Network in the Automated Systems of Accounting and Management of the Power Consumption 651
- Kolesnikov A. A., Kolesnikov Al. A., Kuz'menko A. A.** The ADAR Method and Theory of Optimal Control in the Problems of Synthesis of Nonlinear Control Systems 657

ROBOTIC SYSTEMS

- Aliseychik A. P., Orlov I. A., Kolesnichenko E. Yu., Pavlovsky V. E., Pavlovsky V. V., Platonov A. K.** BioMech Rehabilitation Exoskeleton: Models, Control, Design, Experiments 670

APPLICATION CONTROL SYSTEM

- Arakcheev P. V., Bezdelov V. L., Buryi E. V.** Determination of the Relay Controller Parameters for the Optoelectronic Thermal Stabilization System Operating at Low Ambient Temperatures 678
- Sidorov I. S., Lysov V. E.** Analysis of the Influence of the Sampling Rate Position Regulator of the Position Servo Electric Drive on the Dynamic Parameters of the Quality Control . . . 685
- Andriyanov A. I., Mikhaltsov D. Yu.** Experimental Study of Nonlinear Dynamics of Switching Power Converters Based on Target-Oriented Control 690

CONTROL IN AEROSPACE SYSTEMS

- Markelov V. V., Shukalov A. V., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechayev V. A.** Algorithm for Calculation of the Aircraft Navigational Flight Parameters on RNAV Routes 697
- Kolisnichenko A. V., Fedunov B. E.** Onboard Intelligent Information System of the Situational Awareness of a Helicopter Crew 703
- Bolshakov A. A., Kulik A. A., Scripal E. N., Sergushov I. V.** Designing the Security Control System for Helicopter 708

EDUCATION IN MECHATRONICS AND ROBOTICS

- Lopota A. V.** Robotics and Education in the Context of Transition to the High-tech Society . . 716

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

Т. Т. Оморов, чл.-корр., д-р техн. наук, зав. лабораторией, omorovtt@mail.ru,

Национальная академия наук Кыргызской Республики, Бишкек,

Б. К. Такырбашев, начальник службы релейной защиты и автоматики, b.takyrbashev@gmail.com,

ОАО "Северэлектро", Бишкек

Идентификация состояния распределительной электрической сети в системах автоматизации учета и управления энергопотреблением

Распределительная электрическая сеть (РЭС) рассматривается как объект автоматизации, где осуществляется отпуск электроэнергии как товарной продукции. Создание и внедрение современных автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) делает актуальной проблему идентификации электрического состояния РЭС и локализации координат неконтролируемых (ненормативных) потерь электроэнергии при наличии возмущающих факторов, таких как несанкционированный отбор электроэнергии и утечка токов в сети. Применение для этой цели существующих методов и алгоритмов в реальном времени представляет определенные сложности из-за стохастического характера отдельных параметров сети, например, активных сопротивлений межабонентских участков, которые существенным образом изменяются в зависимости от внешних факторов (температуры, влажности и др.). В работе предлагаются методологические и алгоритмические основы решения указанной проблемы, ориентированные на создание специального программного обеспечения соответствующей функциональной задачи (подсистемы) АСКУЭ.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, состояние сети, несанкционированный отбор электроэнергии, утечка токов, метод идентификации

Введение

Автоматизация технологических процессов энергопотребления в распределительных электрических сетях в настоящее время осуществляется с использованием современных технологий в виде автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) [1], структура которых состоит из двух или трех иерархических уровней. Общая структура двухуровневой системы показана на рис. 1. Она включает подсистему верхнего уровня

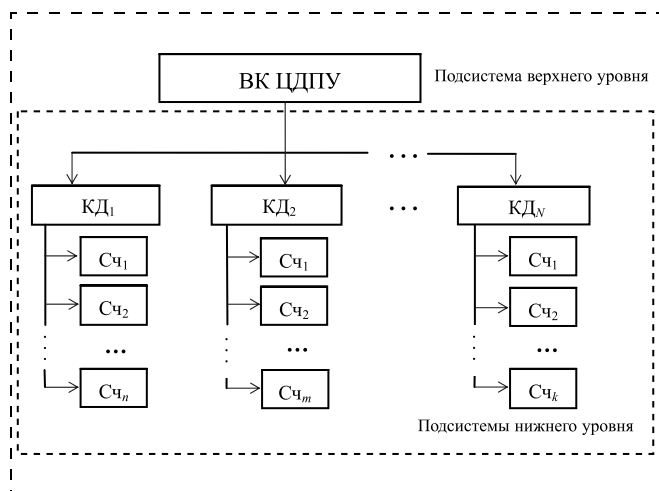


Рис. 1. Общая структура двухуровневой АСКУЭ

на, основу которой составляет вычислительный комплекс (ВК), расположенный в центральном диспетчерском пункте управления (ЦДПУ), и ряд подсистем нижнего уровня, через которые осуществляются контроль, учет и управление процессом энергопотребления.

Каждая подсистема нижнего уровня включает: концентратор данных (КД); группу счетчиков электроэнергии (Сч), установленных у потребителей (абонентов); телекоммуникационные модули (ТКМ), которые строятся по технологии PLC, GSM и входят в состав КД и Сч. Счетчики электроэнергии обеспечивают измерение потребляемой абонентами мощности и количества энергии, а также токов и напряжений на нагрузках потребителей. Концентратор данных строится на основе микропроцессорной техники, располагается в основном в трансформаторной подстанции распределительной электрической сети (РЭС) и выполняет функции сбора данных со счетчиков, их хранение и обработку в целях решения соответствующих функциональных задач нижнего уровня (оценка потерь электроэнергии в РЭС, контроль технического состояния Сч, управление нагрузкой абонентов и др.), а также для передачи необходимых данных на верхний уровень. Вычислительный комплекс (центральный компьютер, сервер базы данных, автоматизированные рабочие места) подсистемы верхнего уровня выполняет следующие основные функции: сбор, хранение и управление общей базой данных;

обработка и анализ полученных от подсистемы нижнего уровня данных в целях решения соответствующих функциональных задач (расчет потерь электроэнергии и составление энергобаланса по системе; принятие управленческих решений; формирование документов, связанных с отчетностью и оплатой за потребленную абонентами электроэнергию, взаимодействие с внешними информационными системами и др.). Функцию обмена информацией между верхним и нижним уровнями системы выполняет ТКМ по технологии GSM.

Процесс функционирования РЭС сопровождается действием ряда возмущающих факторов, вызывающих отклонения РЭС от нормального режима (состояния) и приводящих к дополнительным потерям электроэнергии в сети. В качестве таких возмущающих факторов (возмущений) далее будут рассматриваться несанкционированные отборы электроэнергии и утечки токов в межабонентских участках (МАУ) сети, которые не контролируются системой и имеют случайный характер. В условиях внедрения АСКУЭ становится реальностью постановка и решение таких актуальных проблем в режиме on-line, как:

- идентификация состояния РЭС, позволяющая осуществлять оперативную оценку потерь электроэнергии в сети, включая дополнительные потери, обусловленные действием указанных выше возмущающих факторов;
- выявление и локализация координат действующих в сети возмущений в целях их оперативного устранения.

Применение для этой цели существующих методов [2–5] в режиме реального времени представляет определенные трудности из-за сложности измерения или оценки параметров межабонентских участков сети, таких как их активные сопротивления и токи, протекающие через них. Можно отметить, что токи, протекающие через МАУ, при наличии возмущающих факторов являются случайными функциями, а сопротивления участков сети изменяются в зависимости от внешних факторов (температуры, влажности и др.). Использование же для этой цели технических средств [4–6] приводит к усложнению технической структуры подсистемы нижнего уровня и дополнительным затратам. В работе предлагаются основы нового подхода к идентификации состояний РЭС в условиях действий возмущающих факторов и локализации их координат в сети.

Постановка задачи

Для определенности рассмотрим одну из фаз трехфазной распределительной сети с напряжением 0,4 кВ в симметричном режиме, схема замещения которой показана на рис. 2. Она включает трансформаторную подстанцию (ТП), группу из n нагрузок по-

ребителей и межабонентские участки передачи электроэнергии. Последние, представляющие собой длинные линии, в первом приближении заменены элементами с сосредоточенными параметрами — активными сопротивлениями r_v ($v = \overline{0, n-1}$).

Обозначения имеют следующий смысл:

$U_0 = U_0(t)$ — действующее значение напряжения на выбранной фазе на выходе ТП в момент времени t ;

Z_v — нагрузка v -го абонента ($v = \overline{1, n}$);

$I_v = I_v(t)$ — действующее значение тока в момент времени t , протекающего через нагрузку Z_v ;

$U_v = U_v(t)$ — падение напряжения на нагрузке Z_v ;

$i_v = i_v(t)$ — сила тока, протекающего через активное сопротивление v -го МАУ;

$u_v = u_v(t)$ — падение напряжения на сопротивлении r_v .

Текущее состояние S рассматриваемой электрической сети (рис. 2) описывается следующей системой векторов:

$$\mathbf{I} = [I_0, I_1, \dots, I_n];$$

$$\mathbf{U} = [U_0, U_1, \dots, U_n];$$

$$\mathbf{u} = [u_0, u_1, \dots, u_{n-1}];$$

$$\mathbf{i} = [i_0, i_1, \dots, i_{n-1}].$$

Предполагается, что компоненты векторов $\mathbf{I}$ и $\mathbf{U}$ с требуемой точностью измеряются счетчиками электроэнергии, установленными у абонентов сети. Эти данные передаются концентратору (КД) по технологии PLC и записываются в его базу данных. Компоненты векторов $\mathbf{i}$ и $\mathbf{u}$ в процессе функционирования РЭС не измеряются, и их оценка в реальном масштабе времени представляет определенные сложности в условиях неопределенности, связанной с действием указанных возмущающих факторов и изменением активных сопротивлений r_v ($v = \overline{0, n-1}$) межабонентских участков в зависимости от погодных условий.

Рассмотрим следующие состояния распределительной сети:

- 1) нормальное (базовое) состояние S^* ;
- 2) возмущенное состояние S' .

В каждый момент времени t общий (полезный) ток $I_A(t)$, потребляемый всеми абонентами, определяется выражением

$$I_A(t) = \sum_{v=1}^n I_v(t). \quad (1)$$

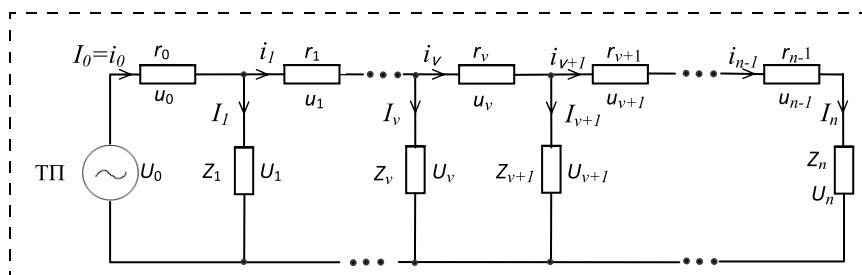


Рис. 2. Схема замещения части РЭС в симметричном режиме

Нормальное состояние сети характеризуется тем, что для всех моментов времени t с определенной точностью выполняется балансовое соотношение

$$I_0(t) = I_A(t), \quad (2)$$

где $I_0(t)$ — сила тока в рассматриваемом фазном проводе на входе сети.

Концентратор данных периодически вычисляет токи $I_0(t)$ и $I_A(t)$ и осуществляет непрерывный контроль выполнения условия (2). При этом базовое состояние $\mathbf{S}^*$ распределительной сети в момент времени $t = t^*$ описывается следующей системой векторов:

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= \mathbf{I}^* = [I_0^*, I_1^*, \dots, I_n^*]; \\ \mathbf{U} &= \mathbf{U}^* = [U_0^*, U_1^*, \dots, U_n^*]; \\ \mathbf{u} &= \mathbf{u}^* = [u_0^*, u_1^*, \dots, u_{n-1}^*]; \\ \mathbf{i} &= \mathbf{i}^* = [i_0^*, i_1^*, \dots, i_{n-1}^*]. \end{aligned}$$

Векторы $\mathbf{u}^*$ и $\mathbf{i}^*$ характеризуют электрическое состояние МАУ сети $\mathbf{S}^*$.

В этом случае компоненты вектора $\mathbf{i}^*$ на основе закона Кирхгофа [7] определяются выражением

$$i_v^* = \sum_{j=v+1}^n I_j^*, I_j^* = I_j(t^*), v = \overline{0, n-1}. \quad (3)$$

Для оценки компонентов вектора $\mathbf{u}^*$ для каждого электрического контура сети составляются соответствующие балансовые соотношения для напряжений [7]. В частности, для v -го контура (рис. 2) эти соотношения имеют вид

$$U_v^* = U_{v+1}^* + u_v^*, v = \overline{0, n-1}.$$

Отсюда определяем

$$u_v^* = U_v^* - U_{v+1}^*, v = \overline{0, n-1}. \quad (4)$$

Считается, что базовое состояние сети $\mathbf{S}^*$, определенное в момент времени $t = t' - \Delta t$ (Δt — достаточно малый интервал времени), сохраняется в процессе оценки параметров возмущенного состояния РЭС.

Теперь предположим, что начиная с момента времени $t = t' = t^* + \Delta t$ условие (2) не выполняется, что приводит к появлению разности токов

$$\Delta I(t) = I_0(t) - I_A(t). \quad (5)$$

При этом с определенной точностью будет иметь место следующее условие:

$$\Delta I(t) > 0. \quad (6)$$

Данный факт свидетельствует, что в момент времени $t = t'$ в сети начинает действовать возмущающий фактор, и РЭС переходит в возмущенное

состояние $\mathbf{S}'$, которое описывается следующим набором векторов:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}' &= [I'_0, I'_1, \dots, I'_n]; \\ \mathbf{U}' &= [U'_0, U'_1, \dots, U'_n]; \\ \mathbf{u}' &= [u'_0, u'_1, \dots, u'_{n-1}]; \\ \mathbf{i}' &= [i'_0, i'_1, \dots, i'_{n-1}]. \end{aligned}$$

Отметим, что компоненты векторов $\mathbf{I}'$ и $\mathbf{U}'$ измеряются счетчиками электроэнергии с требуемой точностью и передаются в концентратор данных, т.е. они являются известными величинами. В то же время для полной оценки возмущенного состояния сети $\mathbf{S}'$ необходимо определить данные о компонентах векторов $\mathbf{i}'$ и $\mathbf{u}'$, описывающих состояние межабонентских участков $\mathbf{S}'_{\text{МАУ}}$.

Таким образом, задача идентификации формулируется следующим образом: на основе данных о нормальном (базовом) состоянии сети $\mathbf{S}^*$ и векторах $\mathbf{I}'$ и $\mathbf{U}'$ требуется оценить компоненты векторов $\mathbf{i}'$ и $\mathbf{u}'$, определяющих возмущенное состояние межабонентских участков $\mathbf{S}'_{\text{МАУ}}$.

Метод решения задачи

Основная идея, используемая при решении сформулированной задачи, состоит в следующем. В результате действия возмущающего фактора силы токов i_v ($v = \overline{0, n-1}$), протекающих через МАУ сети, получают соответствующие приращения Δi_v , т.е.

$$i'_v = i_v^* + \Delta i_v, v = \overline{0, n-1}. \quad (7)$$

Образуем вектор $\Delta \mathbf{i} = [\Delta i_0, \Delta i_1, \dots, \Delta i_{n-1}]$. Теперь основная проблема состоит в нахождении вектора $\Delta \mathbf{i}$. Для этой цели вначале определим вектор $\mathbf{u}' = [u'_0, u'_1, \dots, u'_{n-1}]$, компоненты которого на основе формулы (4) запишутся в виде

$$u'_v = U'_v - U'_{v+1}, v = \overline{0, n-1}. \quad (8)$$

Для каждого контура введем относительный параметр ε_v , определяемый следующей формулой:

$$\varepsilon_v = \frac{u'_v - u_v^*}{u_v^*}, v = \overline{0, n-1}. \quad (9)$$

С учетом (4) и (8) соотношение (9) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= \frac{(U'_v - U'_{v+1}) - (U_v^* - U_{v+1}^*)}{U_v^* - U_{v+1}^*} = \beta_{v-1}, \\ v &= \overline{0, n-1}, \end{aligned} \quad (10)$$

где численные коэффициенты

$$\beta_v = \frac{U'_v - U'_{v+1}}{U_v^* - U_{v+1}^*}. \quad (11)$$

Физически параметр ε_v определяет относительное изменение напряжения u'_v на сопротивлении r_v за счет действия возмущающего фактора. Вместе с тем для напряжений u_v^* и u'_v по закону Ома справедливы следующие выражения:

$$u_v^* = i_v^* r_v, \quad (12)$$

$$u'_v = i'_v r_v, \quad v = \overline{0, n-1}, \quad (13)$$

где сопротивления r_v являются неизвестными.

Теперь с учетом выражений (7), (12) и (13) для параметров ε_v можно получить следующие соотношения:

$$\varepsilon_v = \frac{(i_v^* + \Delta i_v) r_v - i_v^* r_v}{i_v^* r_v} = \frac{\Delta i_v}{i_v^*}, \quad v = \overline{0, n-1}. \quad (14)$$

Далее, приравнявая правые части (10) и (14), получаем, что

$$\frac{\Delta i_v}{i_v^*} = \beta_v - 1, \quad v = \overline{0, n-1}. \quad (15)$$

Формула (15) позволяет в явной форме оценить искомые приращения токов:

$$\Delta i_v = (\beta_v - 1) i_v^*, \quad v = \overline{0, n-1}, \quad (16)$$

где базовые токи i_v^* вычисляются по формуле (3).

Соотношения (16) по существу устанавливают закон изменения приращений токов Δi_v , протекающих в МАУ сети, относительно их базовых значений i_v^* ($v = \overline{0, n-1}$) при наличии возмущающего фактора.

В результате с учетом (16) компоненты искомого вектора $\mathbf{i}'$ вычисляются по следующему простому алгоритму:

$$i'_v = i_v^* + (\beta_v - 1) i_v^* = \beta_v i_v^*, \quad v = \overline{0, n-1}, \quad (17)$$

где коэффициенты β_v вычисляются по формуле (11).

Подход к оценке неконтролируемых (неизменяемых) параметров МАУ распределительной сети на основе соотношений (16) и (17) в дальнейшем назовем *методом приращений*.

Таким образом, метод приращений дает возможность в реальном масштабе времени идентифицировать возмущенное состояние РЭС в условиях неопределенности. Результаты идентификации можно использовать для оценки ненормативных потерь электроэнергии, включая дополнительные потери, вызванные действием возмущающего фактора. При этом имеется возможность учета действий в РЭС нескольких возмущений и не требуется знания данных об активных сопротивлениях МАУ сети.

Далее рассмотрим возможность использования метода приращения для локализации координат

возмущающих факторов в сети. Можно выделить следующие возможные случаи:

1) в РЭС имеет место одиночный возмущающий фактор;

2) в РЭС одновременно действуют несколько возмущений;

3) в РЭС имеются несколько возмущающих факторов, действующих последовательно в разные моменты времени.

Вначале сформулируем критерий идентификации возмущающих факторов. Предположим, что на основе метода приращений найден вектор $\Delta \mathbf{i} = [\Delta i_0, \Delta i_1, \dots, \Delta i_{n-1}]$. Не трудно заметить, что его компоненты Δi_v имеют только m различных значений, где m — общее число одновременно действующих возмущающих факторов. Данное свойство позволяет установить условия, при выполнении которых возможна локализация координат возмущений в сети. Для этой цели введем следующие разности:

$$\Delta J_v = \Delta i_v - \Delta i_{v+1}, \quad v = \overline{0, n-1}, \quad (18)$$

где $\Delta i_n = 0$.

Образует вектор $\Delta \mathbf{J} = [\Delta J_0, \Delta J_1, \dots, \Delta J_{n-1}]$. Простой анализ показывает, что этот вектор обладает следующими свойствами:

- число его ненулевых элементов равно числу возмущающих факторов, действующих в данное время в распределительной сети;
- индексы (номера) его ненулевых компонентов определяют координаты возмущений.

Указанные свойства вектора $\Delta \mathbf{J}$ дают возможность сформулировать следующий критерий идентификации: координаты возмущающих факторов, действующих в распределительной сети в момент времени $t = t^*$, определяются индексами тех элементов вектора $\Delta \mathbf{J} = [\Delta J_0, \Delta J_1, \dots, \Delta J_{n-1}]$, при которых выполняются условия

$$J_v > 0, \quad v = \overline{0, n-1}. \quad (19)$$

Для иллюстрации методики локализации возмущающих факторов рассмотрим следующие примеры.

Пусть в распределительной сети действует одиночное возмущение. Предположим, что при этом найденный на основе метода приращений вектор $\Delta \mathbf{i}$ имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{i} &= [\Delta i_0, \Delta i_1, \dots, \Delta i_{k-1}, \Delta i_k, \Delta i_{k+1}, \dots, \Delta i_n] = \\ &= [\Delta I, \Delta I, \dots, \Delta I, 0, 0, \dots, 0], \end{aligned}$$

где

$$\Delta I = \Delta i_0 = I_0 - \sum_{v=1}^n I_v^*, \quad \Delta i_v = \Delta I; \quad v = \overline{0, k-1},$$

$$\Delta i_v = 0, \quad v = \overline{k, n-1}.$$

Теперь по формуле (18) вычислим компоненты вектора $\Delta \mathbf{J}$:

$$\Delta \mathbf{J} = [0, 0, \dots, 0, \Delta I, 0, \dots, 0].$$

Из структуры вектора $\Delta \mathbf{J}$ видно, что критериальное условие (19) выполняется при $v = k$. Отсюда следует, что одиночный возмущающий фактор действует в k -м межабонентском участке сети.

Структура вектора $\Delta \mathbf{i}$ позволяет идентифицировать и координаты нескольких возмущающих факторов, действующих одновременно. Допустим, что в распределительной сети одновременно действуют два возмущения. Пусть при этом найденный на основе вышеизложенной методики вектор $\Delta \mathbf{i}$ имеет вид

$$\Delta \mathbf{i} = [\Delta i_0, \Delta i_1, \Delta i_2, \Delta i_3, \Delta i_4, \Delta i_5, \dots, \Delta i_{n-1}, \Delta i_n] = \\ = [\Delta I, \Delta I, \Delta I_1, \Delta I_1, \Delta I_1, 0, 0, \dots, 0, 0],$$

где $\Delta i_0 = \Delta i_1 = \Delta I$, $\Delta i_2 = \Delta i_3 = \Delta i_4 = \Delta I_1$,

$$\Delta i_l = 0 \quad (l = \overline{5, n-1}), \quad \Delta I = I_0 - \sum_{v=1}^n I_v^*.$$

Теперь, используя формулу (18), определим компоненты вектора $\Delta \mathbf{J}$:

$$\Delta \mathbf{J} = [0, \Delta \tilde{I}, 0, 0, \Delta I_1, 0, 0, \dots, 0],$$

где $\Delta \tilde{I} = \Delta I - \Delta I_1$.

Анализ структуры вектора $\Delta \mathbf{J}$ на основе критерия (19) показывает, что возмущающие факторы действуют в первом и четвертой межабонентских участках распределительной сети.

Метод приращений можно использовать и для идентификации координат нескольких возмущающих факторов, действующих последовательно в разные моменты времени. В частности, в случае, когда в сети действуют два возмущающих фактора, обобщенный алгоритм их локализации включает следующие основные этапы.

1. Периодически осуществляется опрос всех счетчиков электроэнергии (Сч) и результаты измерений — векторы $\mathbf{I} = [I_0, I_1, \dots, I_n]$ и $\mathbf{U} = [U_0, U_1, \dots, U_n]$ — записываются в базу данных концентратора (КД).

2. В КД периодически осуществляется вычисление общего тока I_A и разности ΔI по формулам (1) и (5) и непрерывная проверка условия (6). При выполнении условия (6) фиксируется момент времени $t = t'$ наступления первого возмущения и измеряются векторы $\mathbf{I}' = [I'_0, I'_1, \dots, I'_n]$ и $\mathbf{U}' = [U'_0, U'_1, \dots, U'_n]$.

3. На основе изложенного выше метода идентифицируется вектор приращений $\Delta \mathbf{i} = [\Delta i_0, \Delta i_1, \dots, \Delta i_{n-1}]$, вызванный действием первого возмущения и определяющий возмущенное состояние межабонентских участков сети $\mathbf{S}'_{\text{МАУ}}$.

4. Формируется критериальный вектор $\Delta \mathbf{J} = [\Delta J_0, \Delta J_1, \dots, \Delta J_n]$ с использованием соотношения (18).

5. На основе критериального условия (19) идентифицируются координаты первого возмущающего фактора.

6. Периодически вычисляется разность

$$\Delta I'(t) = I_0(t) - [I_A(t) + \Delta i_0],$$

где Δi_0 — оценка приращения тока на начальном участке сети ($v = 0$), вызванное первым возмущением.

7. Для выявления второго возмущающего фактора непрерывно проверяется условие

$$\Delta I'(t) = 0, \quad t \geq t'. \quad (20)$$

Если условие (20) с заданной точностью выполняется, то в сети пока действует первое возмущение. Как только не выполняется условие (20), в сети начинает действовать второе возмущение. Фиксируется момент времени $t = t''$ ($t'' > t'$), начиная с которого действует второе возмущение, т.е. осуществляется переход сети во второе возмущенное состояние $\mathbf{S}'$.

8. Осуществляется опрос счетчиков электроэнергии, и в базе данных концентратора формируются новые векторы $\mathbf{I}' = [I'_0, I'_1, \dots, I'_n]$, $\mathbf{U}' = [U'_0, U'_1, \dots, U'_n]$, соответствующие моменту времени $t = t''$. В качестве базового состояния сети $\mathbf{S}^*$ принимаются новые векторы $\mathbf{I}^* = [I_0^*, I_1^*, \dots, I_n^*]$, $\mathbf{U}^* = [U_0^*, U_1^*, \dots, U_n^*]$, $\mathbf{i}^* = [i_0^*, i_1^*, \dots, i_{n-1}^*]$, соответствующие моменту времени $t = t'' - \Delta t$.

9. На основе соотношений (16) определяется новый вектор приращений $\Delta \mathbf{i} = [\Delta i_0, \Delta i_1, \dots, \Delta i_{n-1}]$, соответствующий второму возмущению.

10. Формируется критериальный вектор $\Delta \mathbf{J} = [\Delta J_0, \Delta J_1, \dots, \Delta J_n]$ на основе соотношений (18) с использованием компонент вектора $\Delta \mathbf{i} = [\Delta i_0, \Delta i_1, \dots, \Delta i_{n-1}]$.

11. На основе критериального условия (19) идентифицируются координаты второго возмущающего фактора.

Использование этого алгоритма позволяет аналогичным образом определить координаты трех и более возмущающих факторов, действующих в сети последовательно в разные моменты времени.

Заключение

Предложен новый подход к идентификации состояния распределительной электрической сети в симметричном режиме при наличии неконтролируемых возмущающих факторов, названный методом приращений. В качестве возмущающих факторов рассматриваются несанкционированный отбор энергии, а также утечка токов в сети. Результаты идентификации можно использовать для оценки потерь электроэнергии в электрической сети в режиме реального времени, включая дополнительные потери, вызванные указанными возмущающими факторами.

На основе метода приращений разработан алгоритм локализации координат действующих в сети возмущающих факторов, позволяющий в оперативном порядке устранить их и, тем самым, минимизировать ненормативные потери электроэнергии. Полученные результаты можно использовать для создания специального программного обеспечения АСКУЭ, предназначенного для мониторинга текущего состояния распределительной сети, оценки ненормативных потерь электроэнергии и локализации рассматриваемого класса возмущающих факторов в сети.

Список литературы

1. Ожегов А. Н. Системы АСКУЭ. Киров: ВятГУ, 2006, 102 с.

2. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. М.: ЭНАС, 2009, 456 с.
3. Оморов Т. Т., Закиряев К. Алгоритм оценки потерь электроэнергии в системах автоматизации процессов энергопотребления // Наука, техника и образование. 2014. № 5. С. 43–48.
4. Арутюнян А. Г. О расчете дополнительных потерь мощности в трехфазных четырехпроводных сетях // Электричество. 2015. № 10. С. 55–58.
5. Хлебников В. К., Подгорный Д. Э. Методика расчета потерь электроэнергии в сети 0,38 кВ по измерениям напряжений и токов с учетом схемно-технической информации // Изв. вузов. Электромеханика. 2004. № 6.1. С. 28–31.
6. Пат. № 1547 КР. Способ обнаружения мест несанкционированного отбора электроэнергии из линии электроснабжения 0,4 кВ / Оморов Т. Т., Мухутдинов К. Ш., Романчук В. К. // Интеллектуальная собственность. Бишкек. 2013. № 5.
7. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин А. В. Теоретические основы электротехники. Т. 1. СПб.: Питер, 2009. 512 с.

Identification of the State of the Distributive Electrical Network in the Automated Systems of Accounting and Management of the Power Consumption

T. T. Omorov, omorovtt@mail.ru✉,

Institute of Physical-Technical Problems of NAS KR, Bishkek, 720071, KR

B. K. Takyrbashev, b.takyrbashev@gmail.com, Severelectro Co., Bishkek, 720005, KR

Corresponding author: Omorov Turatbek. T., Corresponding Member of NAS KR, Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory of the Institute of Physical-Technical Problems of NAS KR, e-mail: omorovtt@mail.ru

Received on May 25, 2016

Accepted on June 04, 2016

Distributive electrical network (DEN) is considered as an object of automation, which produces electricity as a marketable product. Development and introduction of modern automated control systems and electricity accounting (ACSEA) makes topical the problems of identification of the electrical state of DEN and localization of the coordinates of the uncontrollable (non-normative) disturbing factors, such as unsanctioned use of electricity and leakage currents in the network. Application for this purpose of the existing methods and algorithms in real time presents certain difficulties, because of the stochastic character of separate network parameters, for example, active resistances of the interperson sections, which is changed depending on the external factors (temperature, humidity, etc). The paper offers the methodological and algorithmic basics for solving this problem, based on identification of the current state of the distributive electrical network in the presence of the distributing factors. The received results are oriented on development of special software corresponding to the functional tasks (subsystems) of ACSEA.

Keywords: distributive electrical network, state of the network, unsanctioned use of electricity, leakage currents, method of identification

For citation:

Omorov T. T., Takyrbashev B. K. Identification of the State of the Distributive Electrical Network in the Automated Systems of Accounting and Management of the Power Consumption, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 651–656.

DOI: 10.17587/mau.17.651-656

References

1. Ozhegov A. N. *Sistemy ASKUe* (Systems of ACSEA), Kirov, Izd-vo VjatGU, 2006, 102 pp. (in Russian).
2. Zhelezko Ju. S. *Poteri jelektronegii. Reaktivnaja moshhnost'. Kachestvo jelektronegii* (Power loss. Reactive power'. Power quality), Moscow, JeNAS, 2009, 456 pp. (in Russian).
3. Omorov T. T., Zakirjaev K. *Algoritm ocenki poter' jelektronegii v sistemah avtomatizacii processov jenergotreblenija* (Algorithm for evaluation of power losses in the power automation process of systems), *Nauka, Tehnika i Obrazovanie*, 2014, no. 5, pp. 43–48 (in Russian).

4. Arutjunjan A. G. *O raschete dopolnitel'nyh poter' moshhnosti v trehfaznyh chetyrehprovodnyh setjah* (Additional power loss calculation in three-phase, four-wire networks), *Jelektrichestvo*, 2015, no. 10, pp. 55–58 (in Russian).

5. Hlebnikov V. K., Podgornij D. Je. *Metodika rascheta poter' jelektronegii v seti 0,38 kV po izmerenijam naprjazhenij i tokov s uchetom shemno-tehnicheskoi informacii* (Method of calculation electricity losses in grid 0,38 kV measurements of voltages and currents based on circuit-technical information), *Izv. vuzov. Jeletromehanika*, 2004, no. 6.1, pp. 28–31 (in Russian).

6. Patent № 1547 KR. *Sposob obnaruzhenija mest nesankcionirovannogo otbora jelektronegii iz linii jelektronegii 0,4 kV* (Method of detecting unauthorized places of electricity withdrawal from a power line 0,4 kV), Omorov T. T., Muhutdinov K. Sh., Romanchuk V. K., *Intellectualnaja Sobstvennost*, Bishkek, 2013, no. 5 (in Russian).

7. Demirchjan K. S., Nejman L. R., Korovkin A. V. *Teoreticheskie osnovy jelektronegii* (Theoretical foundations of electrical engineering), vol. 1, SPb., Piter, 2009, 512 pp. (in Russian).

А. А. Колесников, Засл. деятель науки и техники РФ, д-р техн. наук, проф., ankolesnikov@sfnedu.ru,

Ал. А. Колесников, канд. техн. наук, доц., alkolesnikov@sfnedu.ru,

А. А. Кузьменко, канд. техн. наук, доц., aakuzmenko@sfnedu.ru,

Институт компьютерных технологий и информационной безопасности

Южного федерального университета, г. Таганрог

Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления¹

Приводится сравнение известного метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) с методом аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР). Показано, что метод АКАР обладает значительными преимуществами, связанными с более простой процедурой аналитического конструирования нелинейных законов оптимального управления, ясной физической трактовкой весовых коэффициентов критериев оптимальности и устойчивостью замкнутых оптимальных систем.

Ключевые слова: нелинейные системы управления, синтез управления, метод АКОР, синергетическая теория управления, метод АКАР

*"На свете есть вещи поважнее открытий —
это знание метода, которым они были сделаны".*

Г. Лейбниц

Введение

В современной теории управления проблема аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР), начиная с работ А. М. Летова и Р. Калмана [1, 2], является основополагающей, но вместе с тем и наиболее трудноразрешимой. Методы АКОР, наряду с принципом максимума Понтрягина, и в настоящее время составляют наиболее важный раздел теории и практики синтеза систем оптимального управления. Однако необходимо отметить, что эти методы нашли свое приложение в основном для линейных объектов и квадратичных функционалов: критерия Летова—Калмана, функционала обобщенной работы (ФОР), критерия взвешенной обобщенной работы (КВОР) и др. При высокой размерности даже линейных объектов решение задачи АКОР встречает определенные трудности, связанные с численным решением уравнений Риккати [1]. Решение же задачи АКОР для нелинейных объектов наталкивается на принципиальные трудности, связанные с нахождением решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Именно этим и объясняется отсутствие достаточного числа публикаций с аналитическим синтезом (без использования численных методов) законов управления нелинейными объектами методами АКОР. В имеющихся же публикациях решению задачи синтеза оптимального управления предшествует линеаризация исходной нелинейной математической модели объекта или использование прогнозирующих линейных моде-

лей и дальнейшее применение численных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. Но, тем не менее, интерес к практическому применению методов АКОР по-прежнему высок: так, поисковый запрос "LQR or LQG" в реферативной системе Scopus только за период 2000—2016 гг. выдает более 5000 уникальных ссылок на научные работы.

Отметим, что обозначенные выше проблемы АКОР усугубляются проблемой выбора весовых коэффициентов оптимизирующих функционалов, которая так и не получила приемлемого для проектировщиков решения: выбор этих коэффициентов заранее не определен физически ясными рекомендациями. Если в линейном случае подбор весовых коэффициентов квадратичных критериев можно каким-то образом организовать путем моделирования на ЭВМ переходных процессов в замкнутой линейной системе, то в нелинейном случае такой подход математически некорректен. Это объясняется тем общеизвестным фактом, что для нелинейных систем несправедлив принцип суперпозиции, а их поведение, в отличие от линейных, существенным образом зависит от начальных условий. В связи с этим, выбрав в результате моделирования нелинейной системы на ЭВМ те или иные подходящие, на первый взгляд, весовые коэффициенты соответствующих критериев, можно получить практически неработоспособную нелинейную систему, так как при других начальных условиях ее поведение может качественно измениться. Удивительно, но этот общеизвестный факт в литературе затушевывается, хотя его влияние на поведение синтезируемых систем носит, вообще говоря, принципиальный характер. По-видимому, в головах

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-00782-а).

многих исследователей продолжает доминировать идеология классической линейной теории управления. В настоящее время востребованным направлением теории оптимального управления является управление на основе прогнозирующих моделей (model predictive control) [3–7]. А для дискретных систем управления удастся решить многие задачи оптимального управления на основе полиэдральной методологии [8, 9]. Так, в работе [8] отмечается, что одним из ее основных достоинств является "... ясный инженерный смысл полиэдральных критериев качества процессов управления, простота формализации полиэдральных целей управления, а также полиэдральных фазовых и ресурсных ограничений...".

Современная наука показала, что поведение нелинейных систем наиболее адекватно может быть отражено не столько путем моделирования ее переходных процессов во времени, а, в первую очередь, с помощью фазовых портретов, инвариантных многообразий и аттракторов в их фазовом пространстве. В настоящее время становится очевидным, что следует переходить к новым взглядам на проблему аналитического конструирования регуляторов, опираясь на базовые понятия современной нелинейной динамики и синергетики, а именно: на инвариантные многообразия, аттракторы, самоорганизацию, асимптотические свойства синтезируемых систем и др. Это позволяет весьма эффективно решить проблему формирования структуры и выбора весовых коэффициентов оптимизирующих функционалов, имеющих, как правило, сопровождающий характер.

Постановка задачи управления в методах АКОР и АКАР

Пусть объект управления описывается векторно-матричным дифференциальным уравнением

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{G}(\mathbf{x})\mathbf{u}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$, $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_m)^T$ — векторы фазовых координат и управления; $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_n(\mathbf{x}))^T$ — вектор-функция; $\mathbf{G}(\mathbf{x}) = (g_{ij}(\mathbf{x}))_{n \times m}$ — функциональная матрица.

Задача АКОР формулируется следующим образом [10]:

найти закон управления $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x})$, который переводит объект (1) из любого начального состояния $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ в начало координат фазового пространства $\mathbf{x} = 0$, обеспечивая асимптотическую устойчивость замкнутой системы, и доставляет минимум функционалу

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{F}_0(\mathbf{x}) + \langle \mathbf{u}, \mathbf{D}\mathbf{u} \rangle) dt,$$

где $\mathbf{F}_0(\mathbf{x})$ — знакоопределенная по $\mathbf{x}$ положительная функция; $\langle \cdot \rangle$ — скалярное произведение векторов; $\mathbf{D} = \text{diag}(d_{ij})_{n \times m}$ — диагональная матрица.

Процедура решения задачи АКОР базируется на методе динамического программирования Р. Беллмана. Ключевыми моментами этой процедуры является выбор соответствующей функции Ляпунова и решение алгебраических или дифференциальных уравнений типа Риккати.

Задача аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) формулируется следующим образом [10–12]:

требуется определить такой вектор управления $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x})$, который обеспечивает перевод изображающей точки (ИТ) объекта (1) из произвольного исходного состояния (в некоторой допустимой области) сначала на многообразия $\psi_k(\mathbf{x}) = 0$, а затем движение вдоль них в заданное состояние (в частности, в начало координат $\mathbf{x} = 0$). При этом движение ИТ обязательно должно удовлетворять системе основных функциональных уравнений метода АКАР:

$$T_k \dot{\psi}_k(t) + \varphi_k(\psi_k) = 0. \quad (2)$$

Функции $\varphi_k(\psi_k)$ выбираются таким образом, чтобы, помимо асимптотической устойчивости (2), обеспечить желаемые показатели качества движения ИТ к притягивающим многообразиям $\psi_k(\mathbf{x}) = 0$. В простейшем случае $\varphi_k(\psi_k) = \psi_k$. В общем случае, ИТ системы движется от одного многообразия к другому, пока не достигнет либо финишного многообразия, которое задает желаемый инвариант объекта (1), при скалярном управлении, либо финишных многообразий, которые задают желаемые инварианты объекта (1), при векторном управлении. Представленная выше задача АКАР может быть также сформулирована в терминах оптимального управления: функциональные уравнения (2) являются уравнениями Эйлера—Лагранжа для следующего обобщенного сопровождающего функционала (СОФ):

$$J_0 = \int_0^{\infty} [\varphi_k^2(\psi_k) + T_k^2 \dot{\psi}_k^2(t)] dt. \quad (3)$$

Таким образом, синтезированный методом АКАР вектор управления $\mathbf{u} = \mathbf{u}(\mathbf{x})$ обеспечивает минимум СОФ, т.е. является оптимальным по СОФ. Однако, в отличие от метода АКОР, функционал (3) играет второстепенную (сопровождающую) роль и в процедуре аналитического синтеза вектора управления непосредственно не участвует.

Проиллюстрируем на конкретных примерах системного синтеза сравнение методов АКОР и АКАР, исторически следовавших друг за другом и обладающих как определенной аналогией, так и существенной разницей в подходах к сущности и процедурам аналитического синтеза законов управления.

Сравнительные примеры синтеза законов управления методами АКОР и АКАР

Пример 1. В работе [13] приведен сравнительный пример синтеза законов управления конкретным объектом второго порядка на основе различных методов АКОР с использованием критерия

Летова—Калмана, ФОР и предлагаемого авторами работы [13] КВОР. В качестве сравнительного примера для выявления достоинств и недостатков различных методов АКОР выбрана задача управления короткопериодическим движением самолета, уравнения которого имеют вид

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2; \\ \dot{x}_2(t) &= a_1x_1 + a_2x_2 + a_3u,\end{aligned}\quad (4)$$

где x_1 , x_2 — угол атаки и скорость его изменения, u — отклонение руля высоты, параметры равны: $a_1 = -4,71 \text{ с}^{-2}$; $a_2 = -1,76 \text{ с}^{-1}$; $a_3 = -7,50 \text{ с}^{-2}$.

Ставится задача синтеза в аналитическом виде закона оптимального управления рулем высоты $u_{\text{оп}}(x_1, x_2)$, стабилизирующего движение самолета по углу атаки ($x_1 = x_2 = 0$) при различных критериях качества:

- Летова—Калмана

$$J_1 = \int_0^{\infty} (q_1x_1^2 + q_2x_2^2 + ru^2)dt; \quad (5)$$

- ФОР

$$J_2 = \int_0^{\infty} \left(q_1x_1^2 + q_2x_2^2 + 2ru^2 + \frac{1}{2}ru_{\text{оп}}^2 \right) dt; \quad (6)$$

- КВОР

$$J_3 = \int_0^{\infty} (q_1x_1^2 + q_2x_2^2 + ru \cdot u_{\text{оп}})dt. \quad (7)$$

Решение задачи АКОР сводится к определению законов управления:

- для критерия (5)

$$u = u_{\text{оп}} = -\frac{a_3}{2r} \frac{\partial v}{\partial x_2}; \quad (8)$$

- для критериев (6), (7)

$$u = u_{\text{оп}} = -\frac{a_3}{r} \frac{\partial v}{\partial x_2}. \quad (9)$$

В законы управления (8), (9) входит функция Беллмана $v(x_1, x_2)$ в виде положительно-определенной квадратичной формы:

$$v(x_1, x_2) = A_{11}x_1^2 + A_{12}x_1x_2 + A_{22}x_2^2. \quad (10)$$

Коэффициенты A_{11} , A_{12} , A_{22} в выражении (10) определяются из уравнений Беллмана:

- для критерия (5)

$$\begin{aligned}\frac{\partial v}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial v}{\partial x_2}(a_1x_1 + a_2x_2) - \\ - \frac{1}{4} \frac{a_3^2}{r} \left(\frac{\partial v}{\partial x_2} \right)^2 + q_1x_1^2 + q_2x_2^2 = 0;\end{aligned}\quad (11)$$

- для критериев (6), (7)

$$\frac{\partial v}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial v}{\partial x_2}(a_1x_1 + a_2x_2) + q_1x_1^2 + q_2x_2^2 = 0. \quad (12)$$

В результате решения уравнений (11), (12) находятся значения коэффициентов функций Беллмана (10):

- для критерия (5)

$$(A_{12})_{1,2} = (-2a_1 \pm 2\sqrt{a_1^2 + \beta q_1})/\beta^2; \quad (13)$$

$$(A_{22})_{1,2} = (a_2 \pm \sqrt{\beta(A_{12} + q_2)})/\beta, \quad \beta = a_3^2/r; \quad (14)$$

- для критериев (6), (7)

$$A_{12} = -q_1/a_1, \quad A_{22} = (q_1 - a_1q_2)/(2a_1a_2). \quad (15)$$

Из выражений (13)—(15) следует, что для минимизации критерия J_1 (5) из четырех возможных комбинаций коэффициентов A_{12} и A_{22} необходимо выбрать одну комбинацию этих коэффициентов с положительными вещественными значениями. Для критериев J_2 (6) и J_3 (7) указанная комбинация единственна и, кроме того, в этом случае коэффициенты A_{12} , A_{22} не зависят от параметров a_3 и r . Законы оптимального управления (8) и (9) имеют вид:

- для критерия (5)

$$u_{\text{оп}} = -a_3(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2)/(2r); \quad (16)$$

- для критериев (6), (7)

$$u_{\text{оп}} = -a_3(A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2)/r. \quad (17)$$

Для закона (16) коэффициенты A_{12} , A_{22} определяются из выражений (13) и (14), а для закона (17) — из (15) соответственно. Подставив (16), (17) в уравнение объекта (4), можно записать уравнение замкнутой системы:

- для критерия (5)

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1(t) + (a_3^2 A_{22}/r - a_2)\dot{x}_1(t) + \\ + (a_3^2 A_{12}/(2r) - a_1)x_1 = 0;\end{aligned}\quad (18)$$

- для критериев (6), (7)

$$\begin{aligned}\ddot{x}_1(t) + (2a_3^2 A_{22}/r - a_2)\dot{x}_1(t) + \\ + (a_3^2 A_{12}/r - a_1)x_1 = 0.\end{aligned}\quad (19)$$

В зависимости от знака детерминантов в замкнутых системах (18) и (19) соответственно могут возникнуть монотонные ($D_i > 0$), апериодические ($D_i = 0$) или колебательные ($D_i < 0$) переходные процессы.

В статье [13] для задачи (4) выделяются следующие преимущества методов АКОР по критериям J_2 и J_3 по сравнению с критерием J_1 : а) единственность и простота решения задачи вычисления коэффициентов A_{12} и A_{22} ; б) коэффициенты A_{12} , A_{22} (15) не зависят от параметров a_3 и r ; в) существен-

ное расширение области задания коэффициента r ; г) при одинаковых параметрах a_i объекта (4) и коэффициентах q_1, q_2, r лучшее качество переходных процессов по характеру их протекания и прямым показателям; д) возможность смены стратегий управления относительно функции $u_{оп}$ для критерия J_3 , в том числе с использованием предельно допустимых значений управления.

В работе [13] особо подчеркивается, что формулировка задачи АКОР на основе КВОР (7), по существу, является синергетической, так как допускает многосвязность объекта управления и многовариантность путей достижения цели. Следует напомнить, что общая синергетическая постановка современной проблемы управления впервые была сделана в монографии [11], а в цитируемых в ней работах были ранее заложены основы нового метода АКАР. В связи с этим рассмотрим решение задачи синтеза различных законов оптимального управления объектом (4) с использованием идеологии метода АКАР синергетической теории управления [10–12]. Согласно этому методу введем сначала в рассмотрение функцию преобразования в виде следующей агрегированной макропеременной:

$$\psi(x_1, x_2) = \beta_1 x_1 + x_2. \quad (20)$$

На основе этой макропеременной построим СОФ (3) в виде

$$J_\Sigma = \int_0^\infty [\psi^2 + T^2 \dot{\psi}^2(t)] dt. \quad (21)$$

Подставим в (21) функцию ψ (20) и ее первую производную

$$\dot{\psi}(t) = \beta_1 \dot{x}_1(t) + \dot{x}_2(t) = a_1 x_1 + (\beta_1 + a_2) x_2 + u_1,$$

где $u_1 = a_3 u$, найденную с учетом уравнений объекта (4). В результате получим критерий качества

$$J_4 = \int_0^\infty \left[\left(\frac{\beta_1^2}{T^2} + a_1^2 \right) x_1^2 + \left(\beta_1^2 + a_2^2 + \frac{1}{T^2} \right) x_2^2 + 2(a_1 x_1 + a_2 x_2) u_1 + u_1^2 \right] dt + \\ + 2 \int_0^\infty \left[\left(\frac{\beta_1^2}{T^2} + a_1 a_2 \right) x_1 \dot{x}_1(t) + \beta_1 x_2 \dot{x}_2(t) \right] dt.$$

Второй интеграл в этом выражении может быть вычислен в силу уравнений объекта (4):

$$2 \int_0^\infty \left[\left(\frac{\beta_1^2}{T^2} + a_1 a_2 \right) x_1 \dot{x}_1(t) + \beta_1 x_2 \dot{x}_2(t) \right] dt = \\ = - \left(\frac{\beta_1^2}{T^2} + a_1 a_2 \right) x_{10}^2 - \beta_1 x_{20}^2 = \text{const},$$

так как по условиям устойчивости системы $x_1(\infty) = x_2(\infty) = 0$. В результате критерий качества, полученный на основе СОФ J_Σ (21), макропеременной ψ (20) и уравнений объекта (4), принимает форму

$$J_4 = \int_0^\infty \left[\left(\frac{\beta_1^2}{T^2} + a_1^2 \right) x_1^2 + \left(\beta_1^2 + a_2^2 + \frac{1}{T^2} \right) x_2^2 + 2(a_1 x_1 + a_2 x_2) u_1 + u_1^2 \right] dt. \quad (22)$$

Сначала для синтеза закона управления $u_1(x_1, x_2)$, обеспечивающего оптимальное по критерию (22) управление объектом (4), используем метод динамического программирования. Для этого составим уравнения Беллмана:

$$F(x_1, x_2, u) + f_1(x_1, x_2) \frac{\partial v}{\partial x_1} + f_2(x_1, x_2) \frac{\partial v}{\partial x_2} = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial u_1} + \frac{\partial f_2}{\partial u_1} \frac{\partial v}{\partial x_2} = 0, \quad (23)$$

где F — подынтегральная функция критерия (22); f_1, f_2 — правые части дифференциальных уравнений (4) объекта. Подставив в выражение (23) соответствующие выражения из (4) и (22), получим

$$\left(\frac{\beta_1^2}{T^2} + a_1^2 \right) x_1^2 + \left(\beta_1^2 + a_2^2 + \frac{1}{T^2} \right) x_2^2 + \\ + 2(a_1 x_1 + a_2 x_2) u_1 + u_1^2 + x_2 \frac{\partial v}{\partial x_1} + \\ + (a_1 x_1 + a_2 x_2 + u_1) \frac{\partial v}{\partial x_2} = 0; \quad (24) \\ 2(a_1 x_1 + a_2 x_2) + 2u_1 + \frac{\partial v}{\partial x_2} = 0.$$

Найдем управление u_1 из второго уравнения системы (24):

$$u_1 = - \left(a_1 x_1 + a_2 x_2 + 0,5 \frac{\partial v}{\partial x_2} \right) \quad (25)$$

и подставим его в первое уравнение (24):

$$\beta_1^2 x_1^2 + (1 + \beta_1^2 T^2) x_2^2 - \\ - 2a_1 a_2 T^2 x_1 x_2 + T^2 x_2 \frac{\partial v}{\partial x_1} - \frac{T^2}{4} \left(\frac{\partial v}{\partial x_2} \right)^2 = 0. \quad (26)$$

Это нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных, для решения которого функцию Беллмана $v(x_1, x_2)$, согласно работе [14], можно выбрать в виде определенно-положитель-

ной квадратичной формы координат (10), и, следовательно, ее частные производные имеют вид

$$\frac{\partial v}{\partial x_1} = 2A_{11}x_1 + A_{12}x_2; \quad \frac{\partial v}{\partial x_2} = 2A_{12}x_1 + 2A_{22}x_2. \quad (27)$$

Подставив $\frac{\partial v}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial v}{\partial x_2}$ из выражения (27) в формулу (26) и приравнявая нулю коэффициенты при соответствующих степенях x_1 и x_2 , находим $A_{12} = 2\beta_1/T$; $A_{22} = \beta_1 + 1/T$; $A_{11} = a_1a_2 + \beta_1/T(\beta_1 + 1/T)$. Зная коэффициенты A_{12} , A_{22} из (27), определяем закон управления u_1 (25):

$$u_1 = -\left(a_1 + \frac{\beta_1}{T}\right)x_1 - \left(a_2 + \beta_1 + \frac{1}{T}\right)x_2. \quad (28)$$

Подстановка $2(a_1x_1 + a_2x_2)u_1 = 2a_1x_1\dot{x}_2(t) - 2a_1^2x_1^2 - 2a_2^2x_2^2$ в выражение (22) приводит к следующему критерию:

$$J_5 = \int_0^\infty \left[\left(\frac{\beta_1^2}{T^2} - a_1^2 \right) x_1^2 + \left(\beta_1^2 + \frac{1}{T^2} - a_2^2 - 2a_1 \right) x_2^2 + u_1^2 \right] dt. \quad (29)$$

Это означает, что закон управления (28) доставляет минимум как критерию J_4 (22), так и критерию J_5 (29), т.е. эти критерии эквивалентны в смысле качества переходных процессов в замкнутой системе.

Теперь, в соответствии с методом АКАР, для поиска закона управления используем функциональное уравнение, являющееся простейшей формой (2):

$$T\dot{\psi}(t) + \psi = 0, \quad (30)$$

которое доставляет минимум СОФ J_Σ (21) и, следовательно, критериям J_4 (22) и J_5 (29). С учетом (20) и уравнений объекта (4) из (30) получаем управление

$$u_1 = -\left(a_1 + \frac{\beta_1}{T}\right)x_1 - \left(a_2 + \beta_1 + \frac{1}{T}\right)x_2, \quad (31)$$

совпадающее по структуре с полученным выше законом (28). Закон управления (31) найден в аналитической форме в результате простейшей процедуры удовлетворения функциональному уравнению (30) с учетом уравнений (4) исходного объекта. Исследуем свойство синтезированной замкнутой системы (4), (31):

$$\dot{x}_1(t) = x_2;$$

$$\dot{x}_2(t) = -(\beta_1/T)x_1 - (\beta_1 + 1/T)x_2, \quad (32)$$

условия устойчивости которой имеют простой вид: $\beta_1 > 0$, $T > 0$. Запишем уравнения (32) относительно координаты x_1 :

$$(T/\beta_1)\ddot{x}_1(t) + (T + 1/\beta_1)\dot{x}_1(t) + x_1 = 0. \quad (33)$$

Из (33) следует, что замкнутая система имеет декремент затухания $\xi = \frac{1 + \beta_1 T}{2\sqrt{\beta_1 T}} \geq 1$, а при $\beta_1 T = 1$ имеем $\xi = 1$. Отсюда следует, что переходные процессы в системе при $\xi > 1$ имеют монотонный характер.

Запишем теперь уравнения замкнутой системы (32) в следующей симметричной форме:

$$\frac{dx_1}{x_2} = -\frac{Tdx_2}{(\beta_1x_1 + x_2) + \beta_1Tx_2} = dt.$$

Учитывая функцию (20), запишем это соотношение в виде

$$\frac{dx_1}{x_2} = -\frac{Tdx_2}{\psi(x_1, x_2) + \beta_1Tx_2}. \quad (34)$$

Положив в формуле (34) $\psi = \beta_1x_1 + x_2 = 0$ и интегрируя, находим выражение $\beta_1x_1 = -x_2$, которое точно совпадает с соотношением $\psi = 0$. Это означает, что многообразие $\psi = \beta_1x_1 + x_2 = 0$ является интегралом движения системы дифференциальных уравнений (32). Это означает, что синтезированная система (32) обладает следующим характерным свойством: с течением времени координаты $x_1(t)$ и $x_2(t)$, стартуя из произвольных начальных условий, асимптотически устремляются к многообразию $\psi = 0$ и через время $(4 \div 5)T$ фактически его достигают. Такое многообразие, как известно, называется инвариантным по отношению к системе дифференциальных уравнений (32). Подставив из уравнения $\psi = 0$ координату $x_2 = -\beta_1x_1$ в первое уравнение объекта (4), получим дифференциальное уравнение

$$\dot{x}_{1\psi}(t) = -\beta_1x_{1\psi},$$

которое определяет движение ИТ системы вдоль многообразия $\psi = 0$ к началу координат. Время этого движения $t_\psi = (4 \div 5)\beta_1^{-1}$ определяется значением коэффициента β_1 . Очевидно, что общее время движения ИТ синтезированной системы из произвольного исходного состояния в начало координат определяется верхней оценкой $t_\Sigma \leq (4 \div 5)(T + 1/\beta_1)$.

Закон управления u_1 (28) был получен на основе линейной функции ψ (20). Используем теперь нелинейную функцию преобразования

$$\psi_1 = \beta_1x_1 + \beta_2x_1^3 + x_2 \quad (35)$$

и функциональное уравнение (30) при $\psi = \psi_1$, $T = T_1$. Подставив ψ_1 (35) в СОФ вида J_Σ (21), с учетом

уравнений объекта (4) находим структуру сопрягающего критерия качества:

$$J_6 = \int_0^{\infty} \left[\left(\frac{1}{T_1^2} + \beta_1^2 - 2a_1 - a_2^2 + 6\beta_1\beta_2x_1^2 \right) x_2^2 + \left(\frac{\beta_1}{T_1^2} - a_1^2 \right) x_1^2 + (2\beta_1\beta_2 + 9\beta_2^2x_2^2 + \beta_2^2x_1^2)x_1^4 + u^2 \right] dt. \quad (36)$$

Разумеется, что при $\beta_2 = 0$ критерии (36) и (29) совпадают.

Критерий J_6 (36) содержит, помимо квадратичных форм координат, как в критериях $J_1 - J_5$, также составляющие, пропорциональные четвертой и шестой степеням. Известно, использование критериев с высокими степенями координат позволяет существенно улучшить показатели качества синтезируемых систем управления в отношении их быстродействия, демпфирования колебаний и др. Особенно проявляются достоинства такого рода критериев качества в областях значительных отклонений ИТ системы от заданного состояния. Так, критерий J_6 (36), по сравнению с квадратичным критерием (29), более полно отражает важное требование минимизации больших отклонений, так как в этом случае регулятор будет эффективно подавлять такого рода отклонения координат. Кроме того, присутствие в критерии J_6 также и квадратичных членов x_1^2 , x_2^2 позволяет наделять синтезируемый регулятор необходимой чувствительностью и к малым отклонениям координат. Итак, оптимальный по критерию J_6 (36) регулятор эффективно реагирует как на малые, так и большие отклонения координат. Кроме указанных преимуществ, такого рода критерии качества могут использоваться для аппроксимации других критериев, имеющих важное практическое значение, но для которых отсутствуют эффективные аналитические или численные методы решения задач синтеза законов оптимального управления. В методе АКАР указанные законы определяются в результате простых аналитических процедур с обеспечением условий асимптотической устойчивости движения вдоль соответствующих многообразий. Так, для рассматриваемой здесь задачи, используя функциональное уравнение (30), с учетом уравнений объекта (4) и ψ_1 (35), определяем оптимальный по критерию J_6 (36) нелинейный закон управления

$$u_1 = -(\beta_1/T_1 + a_1)x_1 - (\beta_1 + a_2 + 1/T_1)x_2 - (\beta_2/T_1)x_1^3 - 3\beta_2x_1^2x_2. \quad (37)$$

Этот закон в течение времени $(4 \div 5)T_1$ переводит изображающую точку в окрестность многообразия $\psi_1 = \beta_1x_1 + \beta_2x_1^3 + x_2 = 0$. Разумеется, что при $\beta_2 = 0$ законы управления (37) и (31) совпадают. Найдя теперь из $\psi_1 = 0$ координату $x_{2\psi} = -\beta_1x_{1\psi} - \beta_2x_{1\psi}^3$

и подставив ее в первое уравнение системы (4), получим дифференциальное уравнение

$$\dot{x}_{1\psi}(t) = -\beta_1x_{1\psi} - \beta_2x_{1\psi}^3, \quad (38)$$

которое описывает движение ИТ вдоль многообразия $\psi_1 = 0$ к началу координат фазовой плоскости. Очевидно, что при $\beta_1 > 0$ и $\beta_2 > 0$ это движение асимптотически устойчиво в целом. Иначе говоря, закон управления (37), полученный на основе функции (35), гарантирует асимптотическую устойчивость движения в целом синтезированной нелинейной системы. Кроме того, этот закон обеспечивает также повышенное быстродействие нелинейной системы (4), (37) по сравнению с линейной (31). Это непосредственно следует из свойств дифференциального уравнения (38), характеризующего динамику замкнутой системы (4) на заключительном этапе движения. На рис. 1 изображен фазовый портрет синтезированной системы (4), (31) при $\beta_1 = T_1 = 1$, а на рис. 2 — фазовый портрет синтезированной системы (4), (37) при $\beta_1 = \beta_2 = T_1 = 1$, подтверждающий изложенные соображения о повышенном ее быстродействии.

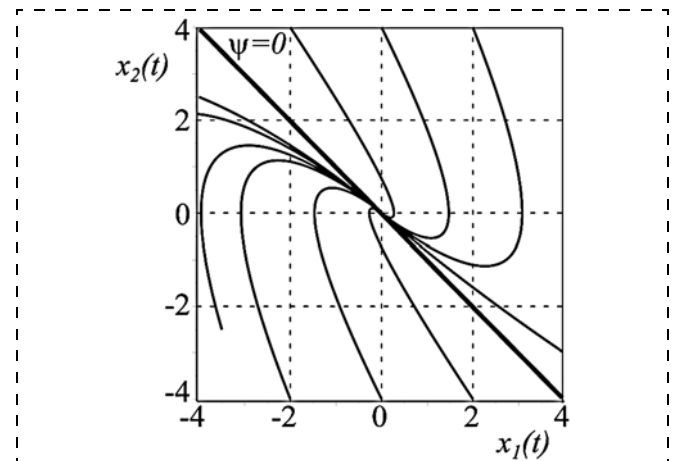


Рис. 1. Фазовый портрет системы (4), (31) при $\beta_1 = T_1 = 1$

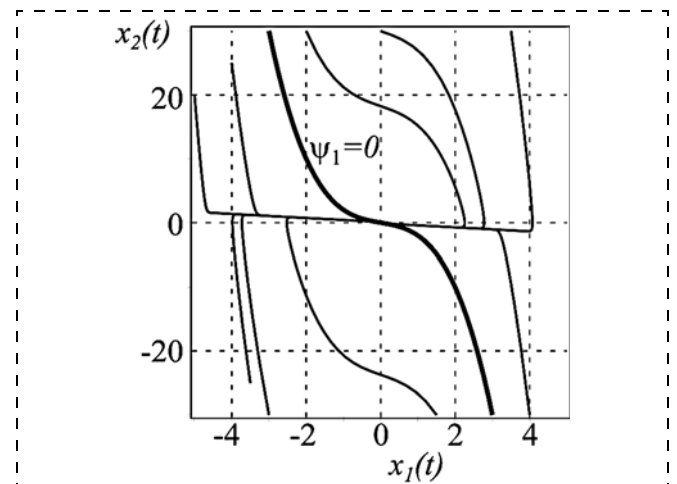


Рис. 2. Фазовый портрет системы (4), (37) при $\beta_1 = \beta_2 = T_1 = 1$

Предположим теперь, что на координату x_2 наложено следующее ограничение:

$$|x_2| \leq B. \quad (39)$$

Применим метод АКАР для синтеза закона управления объектом (4) с учетом этого ограничения. Для этого введем макропеременную

$$\psi_2 = x_2 + B \operatorname{th}(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^3) \quad (40)$$

и, подставив ее в функциональное уравнение (30) при $\psi = \psi_2$, $T = T_2$, найдем с учетом уравнений объекта (4) закон управления

$$u_2 = -a_1 x_1 - \left(a_2 + \frac{1}{T_2} \right) x_2 - \frac{B}{T_2} \operatorname{th}(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^3) - \frac{B(\beta_1 + 3\beta_2 x_1^2)}{\operatorname{ch}(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_1^3)} x_2. \quad (41)$$

Этот закон обеспечивает ограничение (39) и переводит, согласно (30), ИТ замкнутой системы (4), (41) в окрестность многообразия $\psi_2 = 0$, движение вдоль которого будет описываться дифференциальным уравнением

$$\dot{x}_{1\psi}(t) + B \operatorname{th}(\beta_1 x_{1\psi} + \beta_2 x_{1\psi}^3) = 0.$$

Очевидно, что это уравнение при $\beta_1 > 0$, $\beta_2 > 0$ является асимптотически устойчивым относительно $x_1 = 0$. Это означает, что закон управления u_1 (41) при $T_2 > 0$ также обеспечивает асимптотическую устойчивость движения синтезированной системы относительно начала координат. Отметим, что закон (41) в режиме средних отклонений, когда можно положить $\operatorname{th}(\beta_1 x_{1\psi} + \beta_2 x_{1\psi}^3) \approx \beta_1 x_{1\psi} + \beta_2 x_{1\psi}^3$ и $\operatorname{ch}(\beta_1 x_{1\psi} + \beta_2 x_{1\psi}^3) \approx 1$, будет полностью совпадать по своей структуре с законом (37), который, в свою очередь, при $\beta_2 = 0$ переходит в предыдущий закон управления (31). Это означает, что возникает своего рода "эстафета" законов управления, последовательно превращающихся друг в друга по мере движения ИТ синтезированной системы из области больших отклонений в область средних и, в конечном итоге, область малых отклонений с квадратичным критерием качества. На рис. 3 приведен фазовый портрет замкнутой системы (4), (41), а на рис. 4 представлены соответствующие ей графики изменения координат и управления во времени при $\beta_1 = \beta_2 = T_2 = 1$, $B = 5$.

Сравним теперь результаты оптимизации системы (4) на основе критериев Летова—Калмана (5) и (29). Если положить

$$\frac{q_1}{r} = \frac{\beta_1 - a_1^2 T^2}{T^2 a_2^3}; \quad \frac{q_2}{r} = \frac{1 + \beta_1^2 - 2a_1 T^2 - a_2^2 T^2}{T^2 a_2^3}, \quad (42)$$

то при $D_1 \geq 0$ в (18), (19) эти критерии и, следовательно, законы управления (16), (31) точно совпа-

дут, что приведет к полной эквивалентности переходных процессов в синтезируемой оптимальной системе.

Сравним далее результаты оптимизации по критериям ФОР (6), КВОР (7) и (29). Замкнутая система (4), (17), оптимальная по ФОР (6) и КВОР (7), описывается уравнением (19). Если предположить, что параметр $a_1 > 0$, т.е. собственное движение управляемого объекта (4) при $u = 0$ неустойчиво, то тогда замкнутая управлением (17) система (19) при любом сочетании весовых коэффициентов q_1 и r будет также неустойчива, так как в этом случае ко-

эффициент $\frac{a_3^2 A_{12}}{r} - |a_1| = -\frac{a_3^2 q_1}{r|a_1|} - |a_1| < 0$ при по-

зиционном члене станет отрицательным. Указанная особенность требует, очевидно, дополнительных предположений, например, об устойчивости неуправляемого объекта.

Если положить

$$\begin{aligned} \frac{\beta_1}{T} &= -a_1 - \frac{a_3^2 q_1}{r a_1} > 0; \\ \beta_1 + \frac{1}{T} &= \frac{a_3(q_1 - a_1 a_2)}{r a_1 a_2} - a_2 > 0, \end{aligned} \quad (43)$$

то тогда законы управления (17) и (31), оптимальные по ФОР (6), КВОР (7) и (29) соответственно,

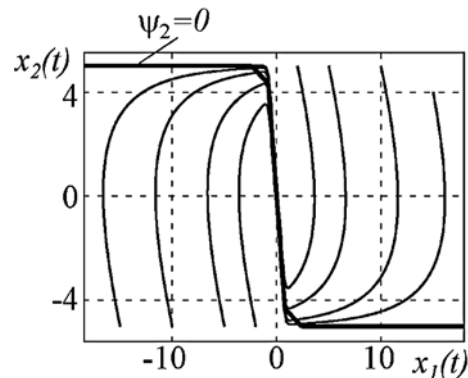


Рис. 3. Фазовый портрет замкнутой системы (4), (41)

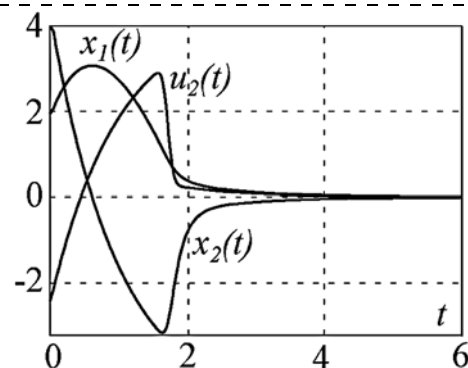


Рис. 4. Графики изменения координат и управления при $\beta_1 = \beta_2 = T_2 = 1$, $B = 5$

полностью совпадут. Разумеется, что при этом параметр $a_1 < 0$, так как в противном случае нарушается условие $\beta_1/T > 0$ (43). Выдерживая соотношения (43) при условии $a_1 < 0$, можно обеспечить полную эквивалентность законов управления (17) и (31) в смысле качества переходных процессов в замкнутой системе. Однако оптимальный по СОФ закон (31) обеспечивает асимптотическую устойчивость синтезированной системы (4), (31) и при произвольных знаках параметров a_i объекта (4), т.е. устойчивость или неустойчивость объекта при $u = 0$ не влияет на свойство устойчивости замкнутой системы.

Итак, при выполнении соотношений (42) для критерия Летова—Калмана (5) или соотношений (43) для ФОР (6) и КВОР (7) соответствующие оптимальные законы управления $u_{оп}$ (16) или $u_{оп}$ (17) точно совпадут с законом u_1 (31), минимизирующим (29). Это будет означать полную тождественность переходных процессов в замкнутой системе, оптимальной по различным критериям качества. Следует особо подчеркнуть то важное обстоятельство, что, согласно (42) и (43), весовые коэффициенты q_1 и q_2 в критериях (5) и (6) выбираются уже не произвольно, а исходя из требований к желаемым свойствам системы (коэффициенты T и β_1) и динамики (параметры a_i) объекта. Что же касается простоты вычисления коэффициентов закона управления (31), оптимального по критерию (29), то для этого не требуется вообще решать какие-либо уравнения типа уравнений Беллмана или Риккати в исходном виде, как в методе Летова—Калмана, или в упрощенной форме, как в методах ФОР и КВОР. Указанные коэффициенты вместе с параметрами объекта a_i входят в критерий (29) и имеют ясный физический смысл — они определяют время движения ИТ синтезируемой системы к инвариантному многообразию $\psi = 0$ (коэффициент T) и время движения вдоль $\psi = 0$ (коэффициент β_1) к началу координат фазовой плоскости системы. Это означает, что зная коэффициенты T , β_1 и параметры объекта a_i , можно, согласно (42) и (43), определить соответственно весовые коэффициенты q_1 и q_2 критериев (5)—(7), т.е. дать этим коэффициентам очевидную физическую интерпретацию. Отсюда следует, что СОФ (29) отражает естественные закономерности процессов управления конкретными объектами. Так, например, применение такого рода подхода, основанного на идеологии метода АКАР, позволило не только осуществить аналитический синтез законов управления объектом (4) с квадратичными критериями качества, но и ввести в проблему АКОР более эффективные СОФ, обеспечивающие повышенное быстроедействие нелинейной системы, ограничение ее координат и т.д. Следует отметить, что решение рассмотренной выше задачи оптимального управления объектом (4) с помощью метода АКАР сводится к элементарным алгебраическим процедурам, носящим характер студенческих упражнений. При этом

использовалась лишь простейшая версия метода АКАР с одним притягивающим многообразием.

Следует особо подчеркнуть, что, в отличие от методов АКОР, СОФ типа (21) и последующие его версии — это, по существу, конструируемый критерий качества, структуры и параметры которого определяются проектировщиком системы управления исходя из физических свойств объекта и предъявляемых к системе инженерных требований. Аналитическая мощь и эвристическая эффективность обобщенного метода АКАР будут показаны в последующих примерах. Здесь же продолжим рассмотрение сравнительных задач оптимального управления различными объектами.

Пример 2. Рассмотрим задачу синтеза законов оптимального управления объектом третьего порядка

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \dot{x}_2(t) = bf(x_1) + x_3; \dot{x}_3(t) = u. \quad (44)$$

В работе [14] рассмотрена задача оптимизации системы управления объектом (44) при $b = 0$, т.е.

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \dot{x}_2(t) = x_3; \dot{x}_3(t) = u. \quad (45)$$

Уравнениями (45) в первом приближении описывается, в частности, процесс аэродинамического торможения при баллистическом входе в атмосферу искусственного спутника Земли. Ставится задача синтеза автопилота, оптимального по критерию

$$J_1 = \int_0^{\infty} (q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + u^2). \quad (46)$$

В работе [14] приведены значения коэффициентов p_k уравнения автопилота

$$u_1 = -p_1 x_1 - p_2 x_2 - p_3 x_3, \quad (47)$$

рассчитанные путем численного решения уравнения Риккати для различных комбинаций весовых коэффициентов q_i критерия качества (46) и построены соответствующие им переходные процессы.

Синтезируем законы управления объектом (45) на основе идеологии метода АКАР в его первой, простейшей версии, т.е. с использованием одного притягивающего многообразия. Для этого сначала введем в рассмотрение линейную макропеременную

$$\psi_1 = x_3 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2. \quad (48)$$

Тогда, подставляя ψ_1 (48) в функциональное уравнение (30) при $\psi = \psi_1$, $T = T_1$ с учетом уравнений объекта (45) находим закон управления

$$u_1 = u = -(\beta_1/T_1)x_1 - (\beta_1 + \beta_2/T_1)x_2 - (\beta_2 + 1/T_1)x_3. \quad (49)$$

Отсюда следует, что управление (47) будет эквивалентно (49) при выборе

$$p_1 = \beta_1/T_1, p_2 = \beta_1 + \beta_2/T_1, p_3 = \beta_2 + 1/T_1. \quad (50)$$

Управление u_1 (49), согласно (30), за время $(4 \div 5)T_1$ переводит ИТ системы в окрестность много-

образия $\psi_1 = 0$ (48), движение вдоль которого описывается следующими уравнениями:

$$\dot{x}_{1\psi}(t) = x_{2\psi}, \quad \dot{x}_{2\psi}(t) = -\beta_1 x_{1\psi} - \beta_2 x_{2\psi}.$$

Очевидно, что при $\beta_1 > 0, \beta_2 > 0$ эта система устойчива, а следовательно, при $T_1 > 0$ устойчива и замкнутая система (45), (49). В зависимости от выбранных значений коэффициентов β_1, β_2 в замкнутой системе можно обеспечить желаемое время и требуемый характер переходных процессов. Выполнение соотношений (50) означает эквивалентность оптимизации системы (45), (49) по квадратичному критерию J_1 (46) и СОФ вида

$$J_2 = \int_0^{\infty} [\psi_1^2 + T_1^2 \dot{\psi}_1^2(t)] dt, \quad (51)$$

где макропеременная ψ_1 определяется выражением (48).

Следует подчеркнуть, что расчет коэффициентов p_i закона управления (47) при оптимизации системы по критерию J_1 (46) требует численного решения нелинейного уравнения типа Риккати, а при оптимизации по СОФ J_2 (51) используются простые аналитические соотношения при синтезе эквивалентного закона управления (49). Еще более возрастают преимущества метода АКАР с повышением размерности систем управления.

Продолжим решение различных задач управления объектом (45) на основе методологии АКАР. Сначала предположим, что на координату x_3 наложено ограничение $|x_3| \leq B$. Для учета этого ограничения, согласно методу АКАР, следует ввести макропеременную

$$\psi_2 = x_3 + B \operatorname{th}(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2). \quad (52)$$

Тогда, используя уравнение объекта (45) и подставляя ψ_2 (52) в функциональное уравнение вида (30) при $\psi = \psi_2, T = T_2$, получим закон управления

$$u_2 = u = \frac{B(\beta_1 x_2 + \beta_2 x_3)}{\operatorname{ch}^2(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2)} - \frac{1}{T_2} \psi_2. \quad (53)$$

Этот закон переводит изображающую точку системы в окрестность многообразия $\psi_2 = 0$, движение вдоль которого описывается дифференциальными уравнениями

$$\dot{x}_{1\psi}(t) = x_{2\psi}, \quad \dot{x}_{2\psi}(t) = -B \operatorname{th}(\beta_1 x_{1\psi} + \beta_2 x_{2\psi}). \quad (54)$$

Система (54) при $\beta_1 > 0, \beta_2 > 0$ асимптотически устойчива относительно $x_{1\psi} = x_{2\psi} = 0$, а следовательно, при $T_2 > 0$ будет асимптотически устойчива относительно начала координат и замкнутая система (45), (53). При этом закон управления u_2 (53) в области малых отклонений вырождается в закон u_1 (49), что означает оптимизацию системы по критерию (46). Иначе говоря, также возникает иерархия законов управления в зависимости от области фазового пространства замкнутой системы.

Предположим теперь, что необходимо синтезировать такой закон управления объектом (45), чтобы координаты x_1 и x_2 находились в режиме устойчивых автоколебаний. Для реализации такого требования сформируем следующую макропеременную:

$$\psi_3 = x_3 + x_1 + (x_1^2 - \varepsilon)x_2. \quad (55)$$

Тогда, подставляя ψ_3 (55) в функциональное уравнение вида (30) при $\psi = \psi_3, T = T_3$, в силу уравнений объекта (45) находим закон управления

$$u_3 = u = -(2x_1 x_2 + 1)x_2 - (x_1^2 - \varepsilon)x_3 - \psi_3/T_3. \quad (56)$$

Этот закон через время $(4+5)T_3$ переводит систему в окрестность многообразия $\psi_3 = 0$ (55), движение вдоль которого описывается известным уравнением Ван-дер-Поля

$$\ddot{x}_{1\psi}(t) - (\varepsilon - x_{1\psi}^2)\dot{x}_{1\psi}(t) + x_{1\psi} = 0. \quad (57)$$

В зависимости от значений параметра ε в системе (57) могут возникать как автоколебания, близкие к синусоидальным (малые ε), так и релаксационные автоколебания (большие ε). Это означает, что координаты $x_1(t)$ и $x_2(t)$ под действием закона управления u_3 (56) будут совершать соответствующие автоколебания. При этом параметр T_3 определяет время выхода синтезированной системы (45), (56) на режим желаемых гармонических или релаксационных колебаний. Разумеется, что в этом случае замкнутая система (45), (56) будет существенно нелинейной. Итак, использование даже простейшей версии метода АКАР с одним многообразием позволяет наделить систему управления объектом (45) разнообразными динамическими свойствами.

Рассмотрим далее задачу синтеза оптимальной системы управления нелинейным объектом (44), когда $b > 0$ и $f(x_1) = \sin x_1$, т.е. уравнения возмущенного движения имеют вид

$$\dot{x}_1(t) = x_2; \quad \dot{x}_2(t) = b \sin x_1 + x_3; \quad \dot{x}_3(t) = u. \quad (58)$$

Уравнениями (58) описывается, в частности, движение математического маятника в верхнем неустойчивом положении, при этом x_1 — угол отклонения маятника от вертикали; x_2 — скорость отклонения; x_3 — момент, приложенный к маятнику. Ставится задача стабилизации маятника моментом, приложенным к нему на оси подвеса. Указанный момент развивается исполнительным механизмом, который представлен интегрирующим звеном. Требуется найти управление $u(x_1, x_2, x_3)$ на входе исполнительного механизма, которое стабилизирует маятник в верхнем положении равновесия, т.е. обеспечивает асимптотическую устойчивость системы. Выберем следующий критерий оптимальной стабилизации:

$$J_4 = \int_0^{\infty} [\psi_4^2 + T_4^2 \dot{\psi}_4^2(t)] dt, \quad (59)$$

где $\psi_4 = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + x_3$. Применяя метод АКАР, на основе функционального уравнения вида (30) при $\psi = \psi_4$, $T = T_4$ находим закон управления:

$$u_4 = u = -(\beta_1/T_4)x_1 - \beta_2 b \sin x_1 - (\beta_1 + \beta_2/T_4)x_2 - (\beta_2 + 1/T_4)x_3, \quad (60)$$

доставляющий минимум критерию качества (59). Исследуем устойчивость движения синтезированной системы, уравнения движения которой вдоль многообразия $\psi_4 = 0$ принимают следующий вид:

$$\dot{x}_{1\psi}(t) = x_{2\psi}, \quad \dot{x}_{2\psi}(t) = b \sin x_{1\psi} - \beta_1 x_{1\psi} - \beta_2 x_{2\psi}.$$

Отсюда следуют неравенства $\beta_1 > b$, $\beta_2 > 0$, $T_4 > 0$, которые являются условиями асимптотической устойчивости в целом синтезированной системы.

Разумеется, что если параметр $b = 0$, то тогда уравнения объектов (45) и (58), а также законы управления (49) и (60) совпадут. Критерий J_4 (59) с учетом уравнений объекта (58) принимает вид

$$J_4 = \int_0^\infty [\beta_1^2 x_1^2 + (\beta_2^2 + T_4^2 \beta_1^2 - 2\beta_1)x_2^2 + (1 + \beta_2^2 T_4^2 - 2\beta_1 T_4^2)x_3^2 + T_4^2 (b^2 \sin^2 x_1 + 2b \sin x_1 + u^2)] dt.$$

Это означает, что для объекта (45) при выполнении соотношений $q_1 = \beta_1^2/T_4^2$, $q_2 = \beta_2^2/T_4^2 + \beta_1^2 - 2\beta_1/T_4^2$, $q_3 = 1/T_4^2 + \beta_2^2 - 2\beta_1$ критерии J_1 (46) и J_4 (60) точно совпадут и, следовательно, будут эквивалентны оптимальные переходные процессы в синтезированной системе. Синтезируем закон стабилизирующего управления объектом (58) теперь уже на основе нелинейной агрегированной макропеременной, например, вида

$$\psi_5 = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + x_3 + \alpha \sin x_1. \quad (61)$$

Используя функцию (61), запишем закон управления

$$u_5 = u = -\frac{\beta_1}{T_5} x_1 - \left(\beta_2 b + \frac{\alpha}{T_5} \right) \sin x_1 - \left(\beta_1 + \frac{\beta_2}{T_5} + \alpha \cos x_1 \right) x_2 - \left(\beta_1 + \frac{1}{T_5} \right) x_3. \quad (62)$$

Уравнения, описывающие движение вдоль многообразия $\psi_5 = 0$, имеют вид

$$\dot{x}_{1\psi}(t) = x_{2\psi}, \quad \dot{x}_{2\psi}(t) = -\beta_1 x_{1\psi} - \beta_2 x_{2\psi} - (\alpha - b) \sin x_{1\psi}. \quad (63)$$

Условия устойчивости системы (63), а следовательно, и условия асимптотической устойчивости в целом синтезированной нелинейной системы (58),

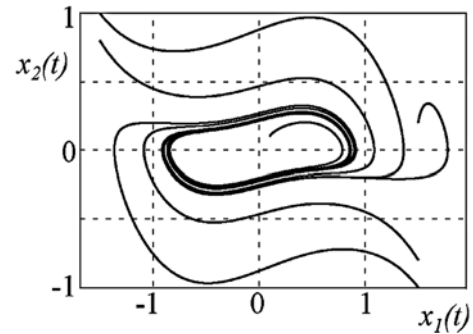


Рис. 5. Проекция фазового портрета замкнутой системы (45), (56) при $\varepsilon = 0,2$, $T_3 = 1$

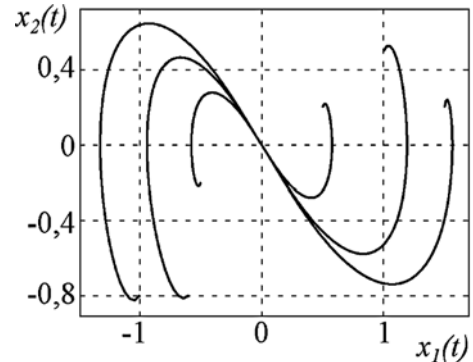


Рис. 6. Проекция фазового портрета замкнутой системы (58), (62) при $b = 1$, $\alpha = 2$, $\beta_1 = \beta_2 = 4$, $T_5 = 1$

(62) весьма просты: $\alpha \geq b$, $\beta_i > 0$, $i = 1, 2$, $T_5 > 0$. Заметим, что если положить $\beta_1 = \beta_2 = 0$, то уравнения (63) будут описывать движение классического математического маятника на многообразии $\psi_5 = 0$. Таким образом, использование нелинейной макропеременной ψ_5 (61) позволило эффективно решить поставленную задачу синтеза стабилизирующего закона управления нелинейным колебательным объектом. На рис. 5 приведена проекция фазового портрета замкнутой системы (45), (56) при $\varepsilon = 0,2$, $T_3 = 1$, а на рис. 6 представлена проекция фазового портрета замкнутой системы (58), (62) при $b = 1$, $\alpha = 2$, $\beta_1 = \beta_2 = 4$, $T_5 = 1$.

Приведенные выше примеры свидетельствуют также о перспективности применения метода АКАР в задачах эквивалентирования критериев оптимальности синтезируемых систем управления.

Многокритериальная оптимизация

Для некоторых объектов выбором функции $\psi(x_1, \dots, x_n)$ и заменой ψ на $\text{th}\psi$ в функциональных уравнениях можно сразу образовать оптимизирующие функционалы, являющиеся аналогами критериев быстродействия и расхода энергии в режимах больших отклонений и квадратичными критериями для режимов малых отклонений.

Рассмотрим синтез системы управления объектом, состоящим из $(n - 1)$ инерционных и одного интегрирующего звеньев, т.е. описываемых уравнениями

$$\begin{aligned} T_1 \dot{x}_1(t) &= k_1 x_2; \\ T_i \dot{x}_i(t) + x_i &= k_i x_{i+1}, i = 2, \dots, n-1; \\ T_n \dot{x}_n(t) + x_n &= k_n u. \end{aligned} \quad (64)$$

Выберем агрегированную переменную

$$\psi = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i, \beta_n = 1, \quad (65)$$

тогда производная $\dot{\psi}(t)$ после подстановки $\dot{x}_i(t)$ из (64) принимает вид

$$\dot{\psi}(t) = \sum_{i=1}^{n-1} (\beta_i k_i / T_i - \beta_{i+1} / T_{i+1}) x_{i+1} + \beta_n k_n u / T_n.$$

Положив, в частности,

$$\beta_i k_i / T_i = \beta_{i+1} / T_{i+1}, \quad (66)$$

получим

$$\dot{\psi}(t) = \beta_n k_n u / T_n. \quad (67)$$

Из соотношения (66) следует выражение

$$\begin{aligned} \beta_i &= T_i / (k_i \dots k_{n-1} T_n), \\ i &= 1, 2, \dots, n-1, \beta_n = 1, \end{aligned} \quad (68)$$

устанавливающее связь между коэффициентами β_i макропеременной ψ и параметрами исходного объекта (64).

Для синтеза управления будем рассматривать функциональное уравнение

$$T \dot{\psi}(t) + \text{th} \psi = 0. \quad (69)$$

Тогда подставив ψ (65) и $\dot{\psi}(t)$ (67) в СОФ

$$J_\Sigma = \int_0^\infty [\text{th}^2 \psi + T^2 \dot{\psi}^2(t)] dt,$$

получаем критерий качества

$$J_1 = \int_0^\infty \left(\text{th}^2 \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \frac{T^2 \beta_n^2 k_n^2}{T_n^2} u^2 \right) dt, \quad (70)$$

который в режиме больших отклонений принимает форму, сходную с критерием быстродействия и затрат энергии на управление

$$J_{1\text{sup}} \sim \int_{t_0 \text{ sup}}^{t_k \text{ sup}} \left(1 + \frac{T^2 \beta_n^2 k_n^2}{T_n^2} u^2 \right) dt. \quad (71)$$

Подставив ψ (65) в функциональное уравнение в силу уравнений объекта (64), получаем оптимальный по критерию (70) закон управления

$$u = -\frac{T_n}{k_n \beta_n T} \text{th} \sum_{i=1}^n \beta_i x_i, \quad (72)$$

который в режиме больших отклонений имеет ограничение

$$u_{\text{max}} = T_n / (k_n \beta_n T),$$

а в режиме малых отклонений с учетом (68) принимает вид

$$u_{\text{inf}} = -\frac{T_n}{k_1 k_2 \dots k_n T} \left(x_1 + \frac{1}{T_1} \sum_{i=2}^n k_1 k_2 \dots k_{i-1} T_i x_i \right). \quad (73)$$

Закон управления u_{inf} (73) точно совпадает с законом, полученным в работе А. А. Красовского [15] при синтезе следящей системы (64), (73), оптимальной по критерию обобщенной работы

$$J_{\text{inf}} = M \left[\int_0^\infty x_1^2 dt \right] \quad (74)$$

при дополнительном условии

$$\frac{1}{k} M \left[\int_0^\infty u^2 dt \right] + k \left[\int_0^\infty \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i x_i \right)^2 dt \right] = \text{const}, \quad (75)$$

где весовой коэффициент k связан с параметром T следующим соотношением:

$$k = T_1 T_2^2 \dots T_{n-2}^2 T_n / (k_1 k_2 \dots k_{n-2} T). \quad (76)$$

В выражении (75) коэффициенты α_i определяются через β_i макропеременной ψ выражением

$$\alpha_i = k_i k_2 \dots k_{n-2} \beta_i / (T_1 T_2^2 \dots T_{n-2}^2 T_n). \quad (77)$$

Приведенное соотношение (76) устанавливает связь между параметром T в критерии (70) и весовым коэффициентом k в критерии обобщенной работы (74), (75), а выражение (77) — между коэффициентами обратных связей β_i и α_i при оптимизации системы соответственно по критериям (70) и (74).

Таким образом, синтезированный закон управления u (72) обеспечивает для объекта (64) переходные процессы, сходные с оптимальным по быстродействию и расходу энергии (71) в режимах больших отклонений, и оптимальные по квадратичному критерию обобщенной работы (74), (75) в режимах малых отклонений от желаемого состояния.

Пример 3. Уравнениями вида (64) описывается достаточно распространенный класс промышленных объектов — электроприводов, транспортных установок, следящих систем и др. На рис. 7, 8 приведены результаты моделирования объекта третьего порядка

вида (64) при $T_1 = 1$; $T_2 = 2$; $T_3 = 1$; $k_1 = k_2 = 1$; $\beta_1 = 1$; $\beta_2 = 2$, описываемого уравнениями

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2; \\ \dot{x}_2(t) + 0,5x_2 &= 0,5x_3; \\ \dot{x}_3(t) + x_3 &= u.\end{aligned}\quad (78)$$

Закон управления (72) объектом (78) принимает вид

$$u = -\frac{1}{T} \text{th}(x_1 + 2x_2 + x_3). \quad (79)$$

На рис. 7 изображены переходные процессы в замкнутой системе (78), (79) при $T = 0,5$, когда критерий (71) принимает вид

$$J_{\text{sup}} \sim \int_{t_0 \text{ ssu}}^{t_k \text{ sup}} (1 + 0,25u^2) dt, \quad (80)$$

а на рис. 8 — при $T = 1$, когда критерий (71) имеет вид

$$J_{\text{sup}} \sim \int_{t_0 \text{ ssu}}^{t_k \text{ sup}} (1 + u^2) dt. \quad (81)$$

Из рис. 7 и 8 следует, что при управлении u (79) переходные процессы в замкнутой системе (78), (79) имеют апериодический характер, при этом для рис. 7, когда параметр компромисса $T = 0,5$, время затухания меньше по сравнению с рис. 8, когда $T = 1$, что соответствует виду критериев (80) и (81) в режиме больших отклонений от заданного состояния объекта.

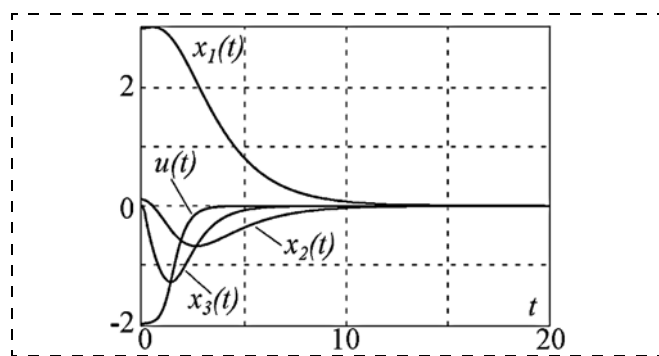


Рис. 7. Переходные процессы при $T = 0,5$

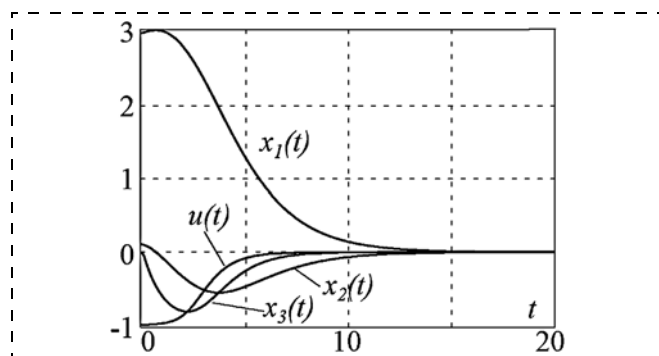


Рис. 8. Переходные процессы при $T = 1$

Рассмотренный здесь подход к многокритериальной оптимизации системы управления объектом (64) опирается на применение СОФ (70), который идентичен частным критериям качества (71) или (74) в соответствующих областях пространства состояний. Это означает, что указанный функционал постепенно, асимптотически сходится к конкретному критерию качества, обеспечивая субоптимальные переходные процессы в системе.

Заключение

В работе проведено сравнение методов АКАР и АКОР на конкретных примерах синтеза систем. Показана эквивалентность этих методов, так и существенная разница в подходах к аналитическому синтезу законов управления: в отличие от методов АКОР, в методе АКАР оптимизирующий функционал является конструируемым критерием качества, структура и параметры которого определяются проектировщиком системы управления исходя из физических свойств объекта и предъявляемых к системе инженерных требований. Синтезируемые методом АКАР законы управления также могут обеспечивать субоптимальные переходные процессы в системе: оптимальные по быстродействию и расходу энергии в режиме больших отклонений от желаемого конечного состояния и оптимальные по квадратичному критерию обобщенной работы в режиме малых отклонений. На примерах синтеза проиллюстрированы явные преимущества метода АКАР как в отношении процедур аналитического конструирования законов управления для нелинейных объектов, обоснованности и однозначности выбора настроечных параметров регуляторов, так и в отношении обеспечения свойств асимптотической устойчивости замкнутых систем.

Список литературы

1. Красовский А. А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973. 560 с.
2. Seron M. M., Braslavsky J. H., Kokotovic P. V., Mayne D. Q. Feedback limitations in nonlinear systems: from Boode integrals to cheap control // IEEE Transactions on Automatic Control. 1999. Vol. 44, Iss. 4. P. 829–833.
3. Garcia C., Prett M. Model predictive control: theory and practice // Automatica. 1989. Vol. 25, Iss. 3. P. 335–348.
4. Åström K. J., Kumar P. R. Control: A perspective // Automatica. 2014. Vol. 50, Iss. 1. P. 3–43.
5. Isidori A. Nonlinear control systems an introduction. Berlin: Springer-Verlag, 1995. 545 p.
6. Hull D. G. Optimal Control Theory for Applications. New York: Springer-Verlag, 2003. 384 p.
7. Burghes D., Graham A. Control and Optimal Control Theories with Applications. London: Woodhead Publishing, 2004. 400 p.
8. Филимонов Н. Б. Непостижимая эффективность математики и кризис современной теории управления // Тр. 4-го Междунар. науч.-техн. семинара "Современные проблемы прикладной математики, информатики, автоматизации, управления". Севастополь: Изд-во ИПИ РАН, 2014. С. 16–28.
9. Филимонов Н. Б. Проблема качества процессов управления: смена оптимизационной парадигмы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 2–11.

10. Современная прикладная теория управления: Ч. II. Синергетический подход в теории управления / Под ред. А. А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. 559 с.

11. Колесников А. А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

12. Kolesnikov A. A. Introduction of synergetic control // Proc. of the American Control Conference ACC-2014, Portland, OR, USA, 4–6 June 2014. P. 3013–3016.

13. Буков В. Н., Сизых В. Н. Приближенный синтез оптимального управления в вырожденной задаче аналитического конструирования регуляторов // Автоматика и телемеханика. 1999. № 12. С. 16–32.

14. Лето́в А. М. Синтез оптимальных систем // Тр. II Междунар. конгресса ИФАК "Оптимальные системы. Статистические методы". М.: Наука, 1965. 456 с.

15. Красовский А. А. Статистическая теория переходных процессов в системах управления. М.: Наука, 1968. 240 с.

The ADAR Method and Theory of Optimal Control in the Problems of Synthesis of Nonlinear Control Systems

A. A. Kolesnikov, ankolesnikov@sfedu.ru, Al. A. Kolesnikov, alkolesnikov@sfedu.ru,

A. A. Kuz'menko, aakuzmenko@sfedu.ru, Southern Federal University, Institute of Computer Technologies and Information Security, Taganrog, 347922, Russian Federation

Corresponding author: Kuzmenko Andrew A., Ph. D., Associate Professor, Southern Federal University, Institute of Computer Technologies and Information Security, Taganrog, 347922, Russian Federation, e-mail: aakuzmenko@sfedu.ru

Received on May 25, 2016

Accepted on June 04, 2016

In the paper the authors compare the known method of Analytical Design of the Aggregated Regulators (ADAR) with the method of Analytical Design of the Optimal Regulators (ADOR). The ADAR method has significant advantages: (i) easier procedure of analytical design of the nonlinear laws of the optimal control; (ii) physically clear presentation of the weight factors of the optimality criterions; and (iii) stability of the closed-loop optimal system. As opposed to the method of the optimal control, the ADAR method is free from the demand to solve Riccati's equation and Bellman's equation, and the procedure of the control laws' analytical design is easier. The control laws designed with ADAR method also may ensure sub-optimal transients in a system: time optimal and energy optimal in the mode of big deviations from the desired final state, as well as optimal to the quadratic criterion of the generalized work (criterion of A. A. Krasovskii) in the mode of small deviations. The provided numerical examples display equivalency of these methods, as well as a significant difference in the approaches used for the analytical design of the control laws, i.e. in contrast to ADOR, in the ADAR method the optimizing functional is a constructed performance criteria, the structure and the parameters of which are defined by the designer of the control system in accordance with the object's physical properties and the desired engineering requirements.

Keywords: control design, nonlinear control systems, optimal control, synergetic control theory

Acknowledgements: This work was supported by RFBR (grant № 14-08-00782-a).

For citation:

Kolesnikov A. A., Kolesnikov A. A., Kuz'menko A. A. The ADAR Method and Theory of Optimal Control in the Problems of Synthesis of the Nonlinear Control Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 657–669.

DOI: 10.17587/mau.17.657-669

References

1. Krasovskii A. A. *Sistemy avtomaticheskogo upravleniya poletom i ih analiticheskoe konstruirovaniye* (Systems of automatic flight control and their analytical design), Moscow, Nauka, 1973, 560 p. (in Russian).

2. Seron M. M., Braslavsky J. H., Kokotovic P. V., Mayne D. Q. Feedback limitations in nonlinear systems: from Bode integrals to cheap control, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1999, vol. 44, iss. 4, pp. 829–833.

3. Garcia C., Prett M. Model predictive control: theory and practice, *Automatica*, 1989, vol. 25, iss. 3, pp. 335–348.

4. Åström K. J., Kumar P. R. Control: A perspective, *Automatica*, 2014, vol. 50, iss. 1, pp. 3–43.

5. Isidori A. Nonlinear control systems an introduction, Berlin, Springer-Verlag, 1995, 545 p.

6. Hull D. G. Optimal Control Theory for Applications, New York, Springer-Verlag, 2003, 384 p.

7. Burghes D., Graham A. Control and Optimal Control Theories with Applications, London, Woodhead Publishing, 2004, 400 p.

8. Filimonov N. B. *Nepostizhimaya jeffektivnost' matematiki i krizis sovremennoj teorii upravleniya* (Incomprehensible efficiency of mathematics and crisis of the modern control theory), *Trudy 4th Mezhdunarodnogo nauchno-tehnicheskogo seminar "Sovremennyye problemy prikladnoy matematiki, informatiki, avtomatizatsii, upravleniya"*, Sevastopol, IPI RAN, 2014, pp. 16–28 (in Russian).

9. Filimonov N. B. *Problema kachestva processov upravleniya: smena optimizatsionnoy paradigmy* (The problem of quality of control processes: change of an optimizing paradigm), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2010, no. 12, pp. 2–11 (in Russian).

10. Kolesnikov A. A. ed. *Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya: Ch. II. Sinergeticheskij podhod v teorii upravleniya* (The modern applied control theory: Part II. Synergetic approach in the control theory), Taganrog, Publishing house of TRTU, 2000, 559 p. (in Russian).

11. Kolesnikov A. A. *Sinergeticheskaya teoriya upravleniya* (Synergetic control theory), Moscow, Jenergoatomizdat, 1994. 344 p. (in Russian).

12. Kolesnikov A. A. Introduction of synergetic control, *Proceedings of the American Control Conference ACC-2014*, Portland, OR, USA, 4–6 June 2014, pp. 3013–3016.

13. Bukov V. N., Sizyh V. N. *Priblizhennyj sintez optimal'nogo upravleniya v vyrozhdennoj zadache analiticheskogo konstruirovaniya regulatorov* (Approximate synthesis of optimum control in a confluent problem of analytical regulators design), *Avtomatika i Telemekhanika*, 1999, no. 12, pp. 16–32 (in Russian).

14. Letov A. M. *Sintez optimal'nyh sistem* (The optimal systems synthesis), *Trudy II Mezhdunarodnogo kongressa IFAC "Optimal'nye sistemy. Statisticheskie metody"*, Moscow, Nauka, 1965, 456 p. (in Russian).

15. Krasovskii A. A. *Statisticheskaya teoriya perehodnyh processov v sistemah upravleniya* (The statistical theory of transient processes in control systems), Moscow, Nauka, 1968, 240 p. (in Russian).

А. П. Алисейчик, atooxa@gmail.com, **И. А. Орлов**, i.orlov@keldysh.ru,
Е. Ю. Колесниченко, decstrela@mail.ru, **В. Е. Павловский**, vlpavl@mail.ru,
В. В. Павловский, vlpavl2000@mail.ru, **А. К. Платонов**, akp31@mail@gmail.com,
 Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН¹

Реабилитационный экзоскелет БиоМех: модели, управление, конструкция, эксперименты

Рассматривается техническая роботизированная система поддержки нейрореабилитационных процедур — реабилитационный экзоскелет БиоМех.

Аппарат является развитием первых версий [8, 9]. Обсуждаются задачи теоретико-механического описания роботизированных экзоскелетов нижних конечностей, динамического моделирования таких систем, создания систем управления ими. Для рассматриваемой двуногой системы исследуются следующие проблемы: кинематический синтез ходьбы на основе технологии видеозахвата движения, решение прямой и обратной динамических задач для нахождения управляющих моментов сил, синтез полной системы управления, верификация найденных решений с помощью физического и натурного моделирования, построение адекватной системы управления приводами для реализации заданного движения. Поставленные задачи исследованы в рамках создания биомехатронного комплекса для нейрореабилитации двигательного аппарата нижних конечностей человека.

Ключевые слова: экзоскелет, биомехатроника, реабилитационно-исследовательский комплекс, вертикализатор, импульсное управление, пневмопривод, электропривод, гибридный привод

Введение

В работе рассматривается двуногая система, называемая экзоскелетом (рис. 1), предназначенная для восстановления двигательной функции у людей, которые долго находились без движения и не могут управлять ногами. Медицинские исследования показывают, что если ноги пациента будут повторять движения, аналогичные ходьбе (даже механически исполнять шагательные паттерны), то есть шанс восстановить нужные нейронные связи, в результате чего человек снова может получить способность ходить. Этот факт определяет актуальность данного исследования.

Для решения поставленной задачи прежде всего требуется найти закон, описывающий движения человека. Для этого применяется система видеозахвата, состоящая из нескольких видеокамер и компьютера. Комплекс алгоритмов компьютерного зрения решает задачи обнаружения частей тела, а также определения положения и ориентации частей тела во время движения. Результатом работы алгорит-

мов является полная кинематическая схема движения, строго повторяющая ходьбу человека. С использованием найденной кинематической схемы далее решается обратная динамическая задача для определения необходимых управляющих моментов сил.

В реальной системе нужно корректировать управление, чтобы устранить влияние возникающих погрешностей, например таких, как неточное задание начальных условий в динамических уравнениях или неточная передача вращающего управляющего момента. В системе имеются датчики уг-

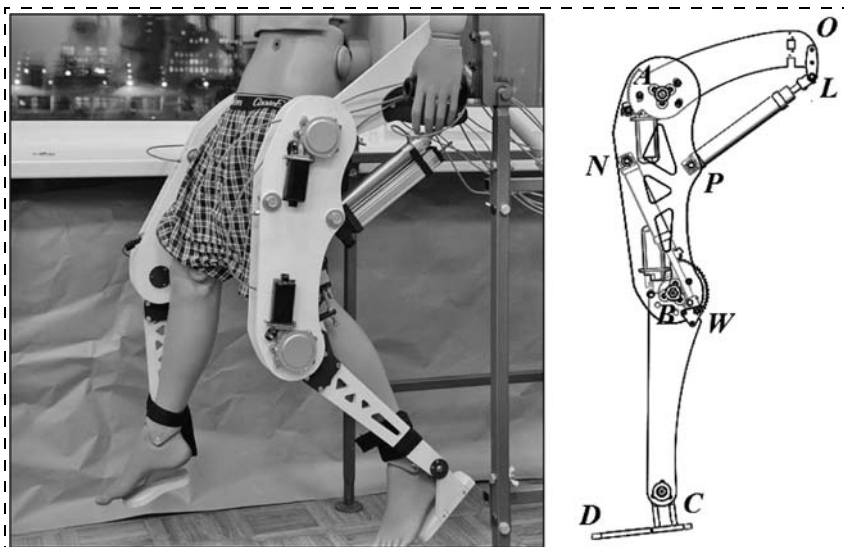


Рис. 1. Общий вид экзоскелета БиоМех (с манекеном) и кинематическая схема одной ноги

¹ Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 11-01-12060-офи-м-2011 в 2011–2012 гг., развитая при поддержке грантов РФФИ 13-01-12037-офи-м, 16-29-08406-офи-м.

лов, с помощью которых отслеживается реальное положение многозвенника. На основе этой информации и программного движения работает следящая система, корректирующая управление экзоскелетом. Полученное управление первоначально проверяется в программной среде *"Универсальный Механизм"*. Модель многозвенника подчиняется заданному управлению. Показано, что моделируемое движение, как свободное, так и при воздействии возмущений, выходит на программную траекторию.

Возможность прессового воздействия на биологически активные зоны стопы, голеностопа и конечностей, особенно нижних, позволяет надеяться на улучшение, а возможно и на восстановление нарушенных при спинномозговой травме вегетативных функций. Соединение таких модулей с механизмом для принудительного движения опорно-двигательного аппарата ноги человека позволяет сформировать требуемый биомехатронный тренажер как на базе имеющихся биомеханических тренажеров с тредбаном, так и в варианте кровати-вертикализатора. Этот же тренажер можно использовать и для восстановления в спортивной медицине, для реабилитации космонавтов и в аналогичных приложениях [1, 2].

Подобные комплексы в настоящее время разрабатываются в целом ряде лабораторий технически развитых стран и коммерческими фирмами. Они являются более или менее сложными устройствами с ручным управлением (которое осуществляет врач или сам пациент) или имеют в своем составе достаточно изощренные системы компьютерного мехатронного управления. Основные типы используемых устройств для стимуляции нижних конечностей опорно-двигательного аппарата человека — стимуляторы стопы для имитации прессурных воздействий или реакции опоры, тренажеры разработки голеностопа и других суставов, вертикализаторы, которые часто применяются для пациентов с ограниченными возможностями, поражениями и травмами спинного мозга (эти тренажеры чрезвычайно важны, чтобы начать реабилитацию практически сразу после травмы, и увеличивают не только скорость реабилитации, но и шанс на полное выздоровление), легопуляторы-экзоскелеты. Передовые современные нейрофизиологические исследования показывают, что задача создания устройств описанного класса чрезвычайно актуальна [3—11].

Медицинские предпосылки, требования к конструкциям

Очевидно, что к таким тренажерным комплексам предъявляются строгие требования безопасности [10], так как при отсутствии у пациента чувствительности нижних конечностей невозможно отследить случайно нанесенный аппаратом ущерб. В связи с этим требуется точная настройка аппарата до использования и обязательное присутствие обратной связи. Также важно учитывать оси и мак-

симальные возможности подвижности суставов пациента. Не менее важным вопросом является сохранение правильной походки пациента. К сожалению, для большинства современных реабилитационных аппаратов данная задача пока остается не до конца решенной, вследствие чего многие люди, прошедшие реабилитацию на локомоторных стимуляторах, имеют неправильную походку (без поворота таза вокруг вертикальной оси тела), что значительно усложняет хождение, а также приводит к постепенной деформации тазобедренного сустава [1—12]. При настройке описанных аппаратов необходимо учитывать уникальность физиологии пациентов, т.е. индивидуальные особенности анатомии и физиологии каждого пациента. Так, например, наличие у пациента какого-либо заболевания, снижающего подвижность суставов, делает для него невозможными шагательные движения с полной амплитудой, требующих сгибания коленной и активной работы тазобедренного сустава.

Описание реабилитационного комплекса, синтез управления, модели

В данной работе описывается опытный образец комплекса мехатронных роботизированных устройств для реабилитации широкого круга пациентов и при различной тяжести заболеваний. Комплекс назван БиоМех, версия 3.

Для разработки отдельных групп мышц и суставов могут применяться как отдельные устройства, так и весь комплекс. В исходной версии комплекс состоит из следующих устройств: тренажера для разработки голеностопного сустава, модуля для стимуляции стопы, тренажера-вертикализатора и легопулятора (экзоскелета нижних конечностей) человека. В развитой последующей версии к ним добавлен специализированный тренажер ног пациента для легких версий тренажа. В дальнейшем планируется дополнить этот состав экзоскелетом рук человека. Далее подробнее опишем экзоскелетный модуль комплекса, так как остальные были представлены в предыдущих публикациях [8, 9].

Видеозахват движения. Синтез походки

Согласно технологии видеозахвата движения проводится запись и обработка естественной ходьбы человека (оператора). Запись осуществляется с помощью двух и более камер типа Kinect, снимающих движение с разных ракурсов. Комплекс алгоритмов компьютерного зрения решает задачи фильтрации шумов изображения, совмещения информации с разных камер и упомянутые выше задачи обнаружения частей тела, а также определения положения и ориентации частей тела во время движения. Эта часть работы реализуется программными пакетами iPi Recorder и iPi Mocap Studio (от iPi Soft LLC) с авторскими доработками. Результатом работы алгоритмов является антропоморфная кинематическая схема движения [12].

Кинематическая схема движения

В результате видеозахвата система синтезирует файл со структурой многозвенной модели. В модели выбирается условный центр отсчета — твердое тело (условно — таз человека), для которого записывается его положение в пространстве x, y, z в неподвижной системе координат и повороты остальных звеньев относительно него в зависимости от времени. Конфигурация каждого следующего звена описывается тремя углами поворота $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ i -го звена относительно предыдущего звена. Считается, что к тазу прикреплены туловище и два бедра, и их положение определяется тремя углами поворота относительно осей, жестко связанных с тазом. Аналогично к бедрам прикреплены голени, а к ним стопы. Туловище (тело аппарата) может быть закреплено жестко. На основе подобных данных для всех конечных и промежуточных звеньев с течением времени синтезируется полный кинематический закон движения модели (походка) — полный вектор углов $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$.

В ходе работы было сформировано несколько типов походок, полученных при ходьбе от разных экспериментаторов (рис. 2, 3). Для всех походок построены наборы углов движения звеньев ног $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$.

Фильтрация данных

Исходные данные после первичной обработки содержат небольшой измерительный шум, который

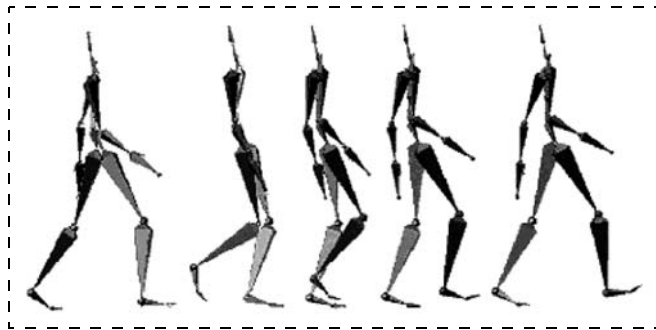


Рис. 2. Найденная видеозахватом походка

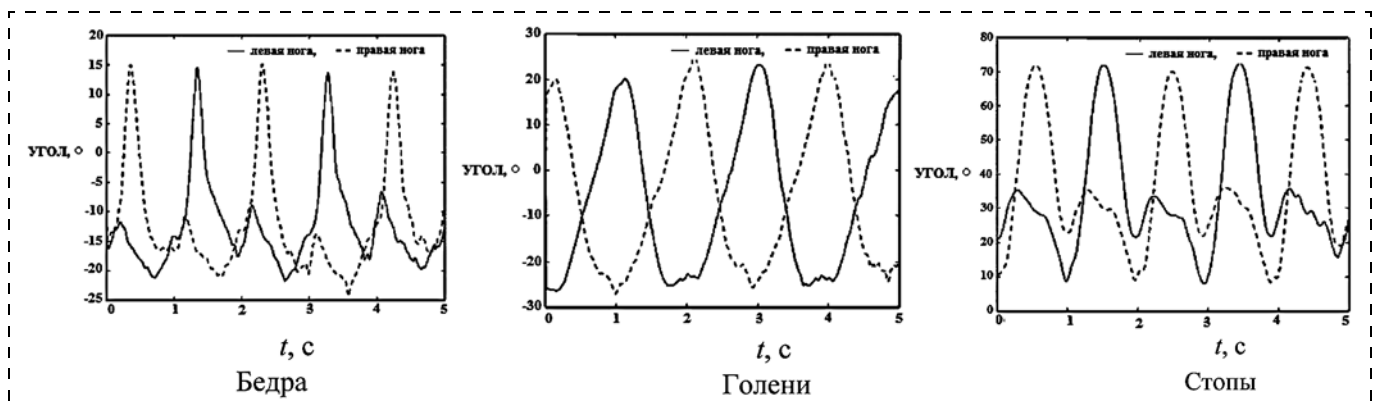


Рис. 3. Законы движения в углах сочленений ног аппарата

при вычислении первой и второй производных (необходимых при решении динамических задач) превращается в шум значительной амплитуды. Здесь в расчете используется специальная фильтрация — оконное преобразование Фурье с функцией окна Ханна, она убирает этот шум:

$$\omega(n) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right].$$

Фактически, в результате такой фильтрации получаются новые, сглаженные функции углов от времени, которые можно направлять в дальнейшую обработку.

Решение динамических задач. Учет динамики приводов

Выпишем базовые уравнения движения звеньев экзоскелета [13–23], из которых определяются управляющие моменты.

▲ Одноногая модель

С точки зрения численных расчетов оказывается более удобной запись уравнений движения в рекуррентной форме типа Ньютона—Эйлера. Рассмотрим i -е звено и жестко связанную с ним систему координат с началом в начале звена. Введем следующие обозначения: a_i — ускорение центра масс i -го звена; a_i^e — ускорение конца звена; r_i — радиус-вектор от начала звена к центру масс звена; r_i^e — радиус-вектор от конца звена к центру масс; l_i — радиус-вектор от начала звена к концу звена; I_i — тензор инерции. Пусть ω_i — угловая скорость; ε_i — угловое ускорение; F_i — сила, приложенная от $(i-1)$ -го звена к i -му звену; M_i — вращающий момент, приложенный от $(i-1)$ -го звена к i -му звену. Выразим F_i и M_i соответственно (фактически, запишем уравнения общих теорем динамики):

$$F_i = F_{i+1} + m_i a_i - m_i g, \quad (1)$$

$$M_i = I_i \varepsilon_i + M_{i+1} - F_i \times r_i + F_{i+1} \times r_i^e. \quad (2)$$

Заметим, $F_{N+1} \equiv 0$ и $M_{N+1} \equiv 0$, так как нет сил и моментов, действующих на конец последнего звена, кроме уже учтенных.

Угловая скорость ω_i , угловое ускорение ε_i выражаются через функции походки, найденные в результате видеозахвата:

$$\omega_i = \omega_{i-1} + \dot{\alpha}_i e_{xi} + \dot{\beta}_i e_{yi} + \dot{\gamma}_i e_{zi}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{i-1} + \dot{\omega}_i + \omega_i \times (\dot{\alpha}_i e_{xi} + \dot{\beta}_i e_{yi} + \dot{\gamma}_i e_{zi}). \quad (4)$$

Ускорения звена a_i и a_i^e могут быть вычислены по формуле Ривальса:

$$a_i^e = a_{i-1}^e + \varepsilon_i \times l_i + \omega_i \times (\omega_i \times l_i); \quad (5)$$

$$a_i = a_{i-1}^e + \varepsilon_i \times r_i + \omega_i \times (\omega_i \times r_i). \quad (6)$$

Соотношения (1)–(6) представляют полную систему уравнений движения звеньев аппарата. Функции $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ считаются известными по походке функциями от времени. Массовые и инерционные параметры также считаются известными. Тогда $\omega_i, \varepsilon_i, a_i^e, a_i$ рассчитываются по приведенным выше формулам. Неизвестными остаются F_i и M_i , но система уравнений для них разрешается рекуррентно. Выполняется это следующим образом.

Первый шаг. При начальных условиях $\omega_0 \equiv 0, \varepsilon_0 \equiv 0, a_0^e \equiv 0$ используем формулы (5), (6) в порядке возрастания i от 1 до N , находим соответственно ω_i, a_i^e, a_i .

Второй шаг. Используем (1), (2) в порядке убывания i от N до 1, находим искомые вращающие моменты в шарнирах M_i и силы F_i .

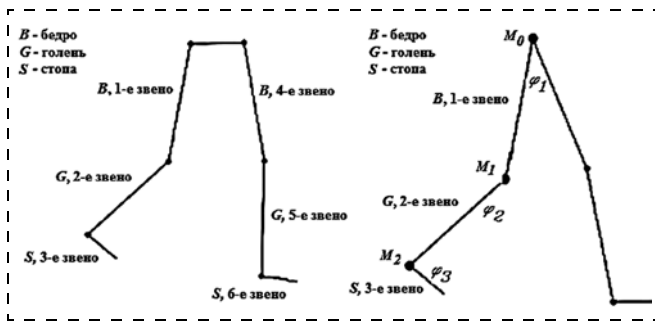


Рис. 4. Структурная модель экзоскелета

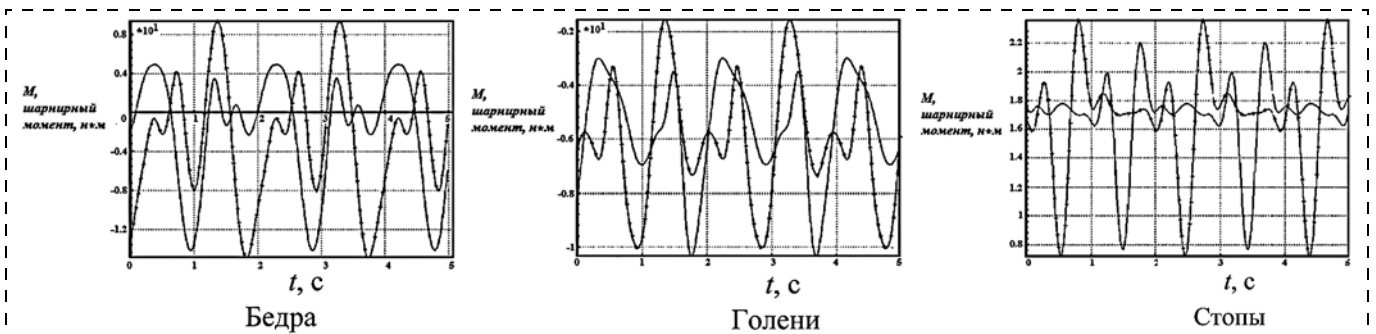


Рис. 5. Управляющие моменты (линия без маркера — для левой ноги; линия с маркером "+" — для правой ноги)

▲ Двуногая модель

Рассмотрим следующую модель. Каждая нога является плоской и представляет собой трехзвено-ник: бедро, голень, стопа. Обе ноги прикреплены к общему неподвижному звену. Решение обратной динамической задачи выполняется на основе уже найденных решений. Структурная схема связей элементов механизма приведена на рис. 4.

Здесь система уравнений движения на основе допущения о закреплении таза в рассматриваемой модели "подвешенного" экзоскелета (экзоскелет не движется свободно в пространстве) распадается на две независимые подсистемы для правой и левой ног, каждая из которых, фактически, совпадает с уравнениями (1)–(6). Их решения M_i и M_i' находятся рекуррентно (нештрихованные переменные — для левой ноги, штрихованные — для правой).

Полученные решения приведены на рис. 5.

После решения обратной динамической задачи строится следящая система и тем самым окончательно синтезируется управление приводами аппарата. Однако, предварительно в ряде случаев выполняется пересчет и контроль величин управляющих моментов с использованием моделей приводов экзоскелета [24–31].

Модели аппаратов и приводов

Реализованы две модели аппаратов. Одна из них (базовая) построена по строго антропоморфной схеме и управляется обычными электроприводами. Вторая является расширенной и построена по специализированной схеме с управлением от пневмоцилиндров [32], ее движение строится по описанной выше схеме на основе модели "вложенного в экзоскелет" антропоморфного аппарата. Схема с пневмоцилиндрами может реализовываться только на основе пневмоуправления или может строиться как гибридная с управлением и от пневмоприводов, и от электроприводов.

В предлагаемой расчетной схеме решения обратных динамических задач использованы соответствующие модели приводов. Выбраны простые модели, чтобы уменьшить объем вычислений. На основе вычисленных выше управляющих моментов сил строятся программы движения приводов.

Электропривод постоянного тока описывается обычным образом, его уравнение имеет вид

$$M = c_1 U - c_2 \dot{\varphi},$$

где M — развиваемый двигателем момент (его скалярная величина); U — управляющее напряжение; φ — угол поворота (вращения) вала двигателя; c_1, c_2 — константные паспортные параметры электродвигателя. В этом уравнении не учтено возможное наличие редуктора и соответственное изменение величин M и φ , однако при необходимости это легко может быть сделано.

Пневмопривод описывается двумя моделями. Эксперименты показали, что при непрерывном управлении пневмопривод на значительной части хода может быть описан простой линейной моделью зависимости развиваемой силы F от давления P в цилиндре

$$F = PS - f_1,$$

где S — некоторая эффективная рабочая площадь цилиндра; f_1 — потери сил в цилиндре, связанные с трением и другими факторами. Параметры S и f_1 в достаточно широком классе управлений можно считать константами и определять при калибровке привода. Использовался также режим ШИМ управления рабочим клапаном цилиндра. Аналогичные эксперименты показали, что зависимость развиваемой силы F от коэффициента заполнения сигнала ШИМ μ ($0 < \mu \leq 1$) по давлению в этом случае близка к квадратичной:

$$F = s_1 \mu^2 + s_2 \mu + s_3,$$

где s_1, s_2, s_3 — калибруемые коэффициенты модели. Момент M , развиваемый приводом в сочленениях, зависит от F и от схемы закрепления привода на аппарате, он определяется "по месту" для конкретных звеньев.

Полное управление

Далее строится полное управление моделью экзоскелета. Оно включает два базовых элемента — следящую систему и систему отработки шагательных паттернов с расчетом обратной кинематической задачи (ОКЗ) и обратной динамической задачи (ОДЗ). Вообще, в контур полного управления экзоскелетом предполагается включить три контура управления:

- контур геометрического (кинематического) управления;
- контур динамического (силового) управления;
- контур биотехнического управления (управления по биотехническим, физиологическим) датчикам.

Два первых контура включаются традиционно на основе следящих систем.

Следящая система. Устойчивость

Полное управление строится по классической схеме линейной следящей ПД-системы. Ее уравнение может быть записано в виде разделенного регулятора для управления u в виде следящей системы с пропорциональным и дифференциальным членами:

$$u = A(\ddot{q}^p + K_v \dot{e} + K_p e) + b + c, \quad (7)$$

где q^p — вектор программного движения системы; e — вектор рассогласования программного и истинного движения системы (ошибка системы); A — матрица, определяемая массами системы; K_v, K_p — матрицы коэффициентов; b, c — компонентные векторы следящей системы. Можно показать, что надлежащим выбором K_v, K_p можно обеспечить и устойчивость построенной системы регулирования, однако лишь в случае, когда приводы имеют достаточный ресурс по управлению. Эксперименты подтвердили достаточность предложенной схемы.

Отработка паттерна шагания в комплексе

После того как характерные траектории паттерна и законы движения изображающих точек по ним построены, выполняется их пересчет в законы движения приводных цилиндров аппарата. Этот пересчет выполняется на основании циклического расчета обратной кинематической задачи (ОКЗ) для легопулятора, которая для него не является тривиальной в силу сложности его кинематической схемы [33].

Для полного расчета ОКЗ и ОДЗ для контроля усилий, развиваемых силовыми цилиндрами, реализована полная динамическая модель комплекса в программном пакете "Универсальный Механизм", объединенном со средствами пакета *MATLAB-Simulink* [34—35].

Программное обеспечение комплекса использует систему на базе модульной микроконтроллерной системы "РОБОКОН" (на основе микроконтроллеров PIC) управления роботами авторской разработки ИПМ им. М. В. Келдыша РАН [26, 27]. Эта система имеет полные библиотеки нижнего уровня для управления приводами и ввода показаний аналоговых и цифровых датчиков. Программы верхнего уровня исполняются на внешнем компьютере, который управляет комплексом и отображает получаемую с него телеметрию.

Вычислительная нагрузка

Основная проблема реализации следящего управления в бортовом варианте заключается в сложной вычислительной нагрузке, которая ложится на бортовой микрокомпьютер. В данной задаче требуются постоянные вычисления матрицы A и векторов b и c в соотношении (7).

Оценка показывает, что для этого в момент времени t при заданных q потребуется не более 500 арифметических операций с плавающей точкой. Считается, что для точного управления моделью достаточно корректировать управление примерно 100...200 раз в секунду. Следовательно, суммарное число арифметических операций в секунду достигнет приемлемых 50 000...100 000.

Заключение

Реализован комплекс решений для задачи управления биомехатронным экзоскелетом с учетом кинематики и динамики аппарата. На основе технологии видеозахвата строятся кинематические схемы походок, набор походок можно расширять.

Обоснована вычислительная эффективность выбора схемы управления для следящей системы при реализации на управляющих микрокомпьютерах. Построены схемы расчета с выбором параметров для следящей системы. Рассмотрен вопрос выбора параметров следящей системы. В программной среде *"Универсальный Механизм"* проверено, что выбранное управление эффективно реализует заданное программное движение при воздействии внешних возмущений.

Выполненные эксперименты (пример приведен на рис. 1) показали адекватность созданного комплекса поставленной задаче. Сформированные численно-аналитические модели позволяют эффективно рассчитывать законы управления приводами комплекса. В настоящее время подготавливается серия конкретных натурных экспериментов на комплексе.

В целом можно сказать, что предлагаемая работа как биомехатронное исследование объединила в разработке реабилитационных комплексов существенные задачи механики, информатики, биомедицины, электроники. В работе показаны способы их решения.

Список литературы

1. Центр авиакосмической медицины. URL: <http://amc-si.com/index.php?thread=24>
2. Имитатор опорной нагрузки подошвенный "Корвит" URL: <http://diasled.ru/korvit>
3. Платонов А. К., Герасименко Ю. П., Ильева-Митутцева Л., Никитин О. А., Сербенюк Н. С., Трифонов О. В., Ярошевский В. С. Биомехатронные элементы стимулятора стопы человека // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2011. № 38. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-38>
4. Platonov A., Mitutsova L., Delchev K., Vitkov V., Chavdarov I., Latkovski V., Yaroshevsky V., Nikitin O. Development of a mechatronic system "GAITSIM" for biomechanical rehabilitation of patients paraplegics // Engineering mechanics. 2007. 14/4. P. 249—258.
5. Platonov A., Ilieva-Mitutsova L., Nikitin O., Chavdarov I., Delchev K., Vitkov V., Yaroshevsky V., Serbenjuk N., Gerasimenko Y. Design of mechatronic system for foot receptor activation intended to improve rehabilitation of paraplegic patients // Proc. of Inter. Conf. "PRAKTRO 2007", 12—15 June 2007. Varna, 2007. P. 19—24.
6. Компания ORMED. URL: <http://www.djoglobal.de/arzt/artromot-k1.html>
7. Тренажер LOCOMAT. URL: <http://www.hocoma.com/products/lokomat/>

8. Гришин А. А., Герасименко Ю. П., Мошонкина Т. Р., Павловский В. Е., Платонов А. К., Сербенюк Н. С. Биомехатроника и лечебно-исследовательские тренажеры: концептуальные и медико-биологические основы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. С. 37—45.
9. Алисейчик А. П., Орлов И. А., Дейнего В. Ю., Павловский В. Е., Платонов А. К. Биомехатронный исследовательский комплекс для двигательной нейрореабилитации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 12. С. 53—58.
10. Головин В. Ф., Павловский В. Е. Новые направления в медицинской и сервисной робототехнике: по материалам международной конференции MESROB 2013 // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 10. С. 15—21.
11. Павловский В. Е., Платонов А. К., Алисейчик А. П., Орлов И. А., Павловский В. В., Птахин А. А. Биомехатронный комплекс нейрореабилитации — концепция, конструкция, модели и управление // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2014. № 111. 19 с.
12. Павловский В. Е., Птахин А. А. Обратная динамическая задача двуногой ходьбы на основе видеозахвата движения // Тез. Научной конференции "Ломоносовские Чтения. Секция механики". 14—23 апреля 2014 года. Москва, ИМ МГУ. М.: ИМ МГУ, 2014. С. 116—117.
13. Павловский В. Е., Платонов А. К., Алисейчик А. П., Орлов И. А., Павловский В. В., Птахин А. А. Нейрореабилитационный комплекс: структура, управление движением экзоскелетных модулей // Тр. Конференции "Вибрация—2014". Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины. 14—16.05.2014. Курск, ЮЗГУ. Т. 2. С. 312—322.
14. Павловский В. Е., Платонов А. К., Алисейчик А. П., Орлов И. А., Птахин А. А. Биомехатронный нейрореабилитационный комплекс для лечебных и исследовательских задач // Тр. второй Междунар. конф. "Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений" (Proc. ITIDS + RRS'2014), 18—21 мая 2014, Уфа, Россия. Т. 2. С. 221—227.
15. Павловский В. Е., Платонов А. К., Алисейчик А. П., Орлов И. А. Биомехатронный комплекс нейрореабилитации — конструкция, модели и управление // Тр. XII Всеросс. совещания по проблемам управления. 16—19 июня 2014. ИПУ РАН. С. 3671—3680.
16. Алисейчик А. П., Орлов И. А., Павловский В. Е., Платонов А. К., Птахин А. А. Синтез антропоморфной ходьбы для специальных экзоскелетов // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. "Экстремальная робототехника" (2014). 2014. С. 116—120.
17. Aliseychik A. P., Orlov I. A., Pavlovsky V. E., Platonov A. K., Ptakhin A. A. Anthropomorphic Walking Design for Special Exoskeletons // Тр. Международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника" (2014) / Proc. of the International Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics". Изд-во "Политехника-Сервис", 2014. С. 121—125.
18. Orlov I. A., Aliseychik A. P., Platonov A. K., Ptakhin A. A., Pavlovsky V. E. Biomechatronic Neurorehabilitation Complex Design, Models and Control // Proc. 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics. 791—796. 2014. August 12—15, Sao Paulo, Brazil.
19. Ptakhin A., Aliseychik A., Orlov I., Pavlovsky V. Anthropomorphic Walking Design for Special Exoskeletons // Proceedings of the RAAD 2014 — 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, September 3—5, 2014, Smolenice Castle, Slovakia.
20. Sokolov S. M., Platonov A. K., Boguslavskiy A. A., Triphonov O. V. Computer Vision System as Part of Bio-mechatronic Rehabilitation Simulator // Robot Intelligence Technology and Applications 2 (Springer Series: Advances in Intelligent Systems and Computing), Ed. Kim J.-H. et al. Vol. 274. 2014. P. 647—656.
21. Соколов С. М., Платонов А. К., Богуславский А. А., Трифонов О. В. Система технического зрения в составе биомехатронного тренажера // Препринт ИПМ им. М. В. Келдыша РАН. 2014. № 42. 19 с.
22. Комплекс для локомоторной тренировки РООИ "ОРБИТА". URL: <http://orbital-rt.ru/index.php/kompleks>
23. Платонов А. К., Павловский В. Е., Сербенюк Н. С., Гришин А. А., Герасименко Ю. П., Мошонкина Т. Р. Биомехатроника лечебно-исследовательского тренажера-кровати // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ISSN 2071—2898 (печатная версия). 2012. № 16. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-16>

24. Гурфинкель В. С., Левик Ю. С., Казенников О. В., Се-
лионов В. А. Существует ли генератор шагательных движений у
человека? // Физиология человека. 1998. Т. 24. № 3. С. 42.

25. Selionov V. A., Ivanchenko Y. P., Solopova I. A., Gurfinkel V. S.
Tonic central and sensory stimuli facilitate involuntary airstepping in
humans // J. Neurophysiol. 2009. V. 101. P. 2847.

26. Павловский В. Е., Павловский В. В. Модульная микро-
контроллерная система управления роботами РОБОКОН-1.
Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша РАН, ISSN 2071–2898
(печатная версия). 2012. № 86. 32 с. URL: [http://library.keldysh.ru/
preprint.asp?id=2012-86](http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-86)

27. Павловский В. Е., Павловский В. В. Масштабируемая
система управления роботами РОБОКОН-1 // Информацион-
но-измерительные и управляющие системы. 2013. № 4. С. 80–92.

28. Вукобратович М. Шагающие роботы и антропоморфные
механизмы. М.: Мир, 1976.

29. Москаленко В. В. Электрический привод. М.: Академия,
2007. 368 с.

30. Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. и др. Гидрав-
лика, гидравлические машины и гидравлические приводы /
Под ред. Т. М. Башты. М.: Машиностроение, 1970. 504 с.

31. Схиртладзе А. Г., Иванов В. И., Кареев В. Н. Гидравли-
ческие и пневматические системы. М.: ИЦ МГТУ "Станкин",
"Янус-К", 2003. 544 с.

32. URL: <http://www.pneumax.ru/>

33. Дубровский В. И., Федорова В. Н. Биомеханика: Учеб.
для сред. и высш. учеб. заведений. М.: Изд-во ВЛАДОС-
ПРЕСС, 2003. 672 с.

34. Погорелов Д. Ю. О численных методах моделирования
движения систем твердых тел // Журнал вычислительной мате-
матики и математической физики. 1995. № 4. С. 501–506.

35. Simulink R2012b Documentation [Online]. URL: [http://
www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/genericengine.html](http://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/genericengine.html)

BioMech Rehabilitation Exoskeleton: Models, Control, Design, Experiments

A. P. Aliseychik, atooxa@gmail.com, I. A. Orlov, i.orlov@keldysh.ru,
E. Yu. Kolesnichenko, decstrela@mail.ru, V. E. Pavlovsky, vpavl@mail.ru,
V. V. Pavlovsky, vpavl2000@mail.ru, A. K. Platonov, akp31mail@gmail.com,
Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, 125047, Russian Federation

Corresponding author: Pavlovsky Vladimir E., D. Sc., Leading Researcher,
Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS, Moscow, 125047, Russian Federation,
e-mail: vpavl@mail.ru

Received on May 25, 2016

Accepted on June 04, 2016

The work presents a technical robotized system for support of the neurorehabilitation procedures — BioMech rehabilitation exoskeleton. The device is an improvement of the first versions published in [8, 9]. The work presents the tasks of the theoretical-mechanical description of the robotized exoskeletons of the lower extremities, dynamic modeling of such systems, and development of the control systems. For the considered biped system the following problems were investigated: kinematic synthesis of walking on the basis of the technology of video capture of the motion, solution of the direct and inverse dynamic tasks for finding of the operating torques of forces, synthesis of a full control system, verification of the found solutions by means of physical and natural modeling, creation of an adequate control system of drives for realization of the set movement. The objectives were investigated within the framework of development of a biomechatronic complex for neurorehabilitation of the motive device of human lower extremities.

Keywords: exoskeleton, biomechatronics, rehabilitation and research complex, verticalizer, pulse control, pneumatic actuator, electric drive, hybrid drive

Acknowledgements: The work was performed as part of the grant RFBR № 11-01-12060-ofi-m-2011 in 2011–2012., Developed with the support of RFBR grant 13-01-12037-ofi-m, 16-29-08406-ofi-m
For citation:

Aliseychik A. P., Orlov I. A., Kolesnichenko E. Yu., Pavlovsky V. E., Pavlovsky V. V., Platonov A. K. BioMech Rehabilitation Exoskeleton: Models, Control, Design, Experiments, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 670–677.

DOI: 10.17587/mau/17.670-677

References

1. *Tsentr aviakosmicheskoi meditsiny* (Center of Aerospace Medicine), available at: <http://amc-si.com/index.php?thread=24>

2. *Imitator opornoi nagruzki podoshvennyi "Korvit"* (Load Simulator supporting plantar "Corvo"), available at: <http://diasled.ru/korvit>

3. Platonov A. K., Gerasimenko Yu. P., Ilieva-Mitutseva L., Nikitin O. A., Serbenyuk N. S., Trifonov O. V., Yaroshevskii V. S. *Biomekhatronnye elementy stimulyatora stopy cheloveka* (Bioelectronic elements of the human foot stimulator), Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN, 2011, no. 38, 32 p., available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-38>

4. Platonov A., Mitutseva L., Delchev K., Vitkov V., Chavdarov I., Latkovski V., Yaroshevsky V., Nikitin O. Development of a mecha-

tronic system "GAITSIM" for biomechanical rehabilitation of patients paraplegics, *Engineering Mechanics*, 2007, vol. 14/4, pp. 249–258.

5. Platonov A., Ilieva-Mitutseva L., Nikitin O., Chavdarov I., Delchev K., Vitkov V., Yaroshevsky V., Serbenyuk N., Gerasimenko Y. Design of mechatronic system for foot receptor activation intended to improve rehabilitation of paraplegic patients, *Proc. of Inter. Conf. "PRAKTRO 2007"*, 12–15 June 2007, Varna, 2007, pp. 19–24.

6. Kompaniya ORMED, available at: [http://www.djoglobal.de/
arzt/artromot-k1.html](http://www.djoglobal.de/arzt/artromot-k1.html)

7. Trenazher LOCOMAT, available at: [http://www.hocoma.com/
products/lokomat/](http://www.hocoma.com/products/lokomat/)

8. Grishin A. A., Gerasimenko Yu. P., Moshonkina T. R., Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Serbenyuk N. S. *Biomekhatronika i lechebno-issledovatel'skie trenazhery: kontseptual'nye i mediko-biologicheskie osnovy* (Mechatronics and medical research simulators: conceptual and biomedical bases), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 12, pp. 37–45.

9. Aliseichik A. P., Oplov I. A., Deinego V. Yu., Pavlovskii V. E., Platonov A. K. *Biomekhatronnyi issledovatel'skii kompleks dlya dvigatel'noi neipopeabilitatsii* (Biomechatronny research facility for motor neypopeabilitatsii), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 12, pp. 53–58.

10. Golovin V. F., Pavlovskii V. E. *Novye napravleniya v meditsinskoj i servisnoj robototekhnike: po materialam mezhdunarodnoi konferentsii MESROB 2013* (New trends in medical and service robotics:

materials of an international conference in 2013 MESROB), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 10, pp. 15–21.

11. Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Aliseichik A. P., Orlov I. A., Pavlovskii V. V., Ptakhin A. A. *Biomekhatronnyi kompleks neiroreabilitatsii — kontseptsiya, konstruktziya, modeli i upravlenie* (Bio mechatronic complex neurorehabilitation — concept, design, and management model), Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN, 2014, no. 111, 19 p.

12. Pavlovskii V. E., Ptakhin A. A. *Obratnaya dinamicheskaya zadacha dvunogoi khod'by na osnove videozakhvata dvizheniya* (Contact dynamic problem biped walking based on motion capture), *Tez. Nauchnoi konferentsii "Lomonosovskie Chteniya. Sektsiya mekhaniki"*, 14–23 april 2014, Moscow, IM MGU, 2014, pp. 116–117.

13. Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Aliseichik A. P., Orlov I. A., Pavlovskii V. V., Ptakhin A. A. *Neiroreabilitatsionnyi kompleks: struktura, upravlenie dvizheniem ekzoskeletnykh modulei* (Neuroreabilitatsionny complex: structure, motion control modules exoskeletal), *Tr. Konferentsii "Vibratsiya—2014". Vibratsionnye tekhnologii, mekhatronika i upravlyaemye mashiny*, 14–16.05.2014, Kursk, YuZGU, vol. 2, pp. 312–322.

14. Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Aliseichik A. P., Orlov I. A., Ptakhin A. A. *Biomekhatronnyi neiroreabilitatsionnyi kompleks dlya lechebnykh i issledovatel'skikh zadach* (Bioelectronic rehabilitation center for teaching and research tasks), *Tr. vtoroi Mezhdunar. konf. "Informatsionnye tekhnologii intellektual'noi podderzhki prinyatiya reshenii" (Proc. ITIDS + RRS'2014)*, 18–21 maya 2014, Ufa, Rossiya, vol. 2, pp. 221–227.

15. Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Aliseichik A. P., Orlov I. A. *Biomekhatronnyi kompleks neiroreabilitatsii — konstruktziya, modeli i upravlenie* (Bio mechatronic complex neurorehabilitation — design model and management), *Tr. XII Vseross. soveshchaniya po problemam upravleniya*, 16–19 iyunya 2014, IPU RAN, pp. 3671–3680.

16. Aliseichik A. P., Orlov I. A., Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Ptakhin A. A. *Sintez antropomorfnoi khod'by dlya spetsial'nykh ekzoskeletonov* (Synthesis anthropomorphic exoskeleton walk for special), *Tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. "Ekstremal'naya robototekhnika"*, 2014, pp. 116–120.

17. Aliseichik A. P., Orlov I. A., Pavlovskii V. E., Platonov A. K., Ptakhin A. A. *Anthropomorphic Walking Design for Special Exoskeletons*, *Proc. of the International Scientific and Technological Conference "Extreme Robotics"*, Politehnika-Servis, 2014, pp. 121–125.

18. Orlov I. A., Aliseichik A. P., Platonov A. K., Ptakhin A. A., Pavlovskii V. E. *Biomechatronic Neurorehabilitation Complex Design, Models and Control*, *Proc. 5th IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 791–796, 2014, August 12–15, Sao Paulo, Brazil.

19. Ptakhin A., Aliseichik A., Orlov I., Pavlovskii V. *Anthropomorphic Walking Design for Special Exoskeletons*, *Proceedings of the RAAD 2014 — 23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region*, September 3–5, 2014, Smolenice Castle, Slovakia.

20. Sokolov S. M., Platonov A. K., Boguslavskiy A. A., Triphonov O. V. *Computer Vision System as Part of Bio-mechatronic Rehabilitation Simulator*, *Robot Intelligence Technology and Applications 2*

(*Springer Series: Advances in Intelligent Systems and Computing*), Ed. Kim J.-H. et al. 2014, vol. 274, pp. 647–656.

21. Sokolov S. M., Platonov A. K., Boguslavskii A. A., Triphonov O. V. *Sistema tekhnicheskogo zreniya v sostave biomekhatronnogo trenazhera* (vision system composed bioelectronic simulator), Preprint IPM im. M. V. Keldysha RAN, 2014, no. 42, 19 p.

22. *Kompleks dlya lokomotornoi trenirovki ROOI "ORBITA"* (Complex for locomotor training ROOI "ORBITA"), available at: <http://orbita-rt.ru/index.php/kompleks>

23. Platonov A. K., Pavlovskii V. E., Serbenyuk N. S., Grishin A. A., Gerasimenko Yu. P., Moshonkina T. R. *Biomekhatronika lechebno-issledovatel'skogo trenazhera-krovati* (Mechatronics medical research simulator beds), Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN, ISSN 2071–2898 (pechatnaya versiya), 2012, no. 16, 32 p. available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-16>

24. Gurfinkel V. S., Levik Yu. S., Kazennikov O. V., Selionov V. A. *Sushchestvuet li generator shagatel'nykh dvizhenii u cheloveka?* (There Generator stepping movements in man?), *Fiziologiya Cheloveka*, 1998, vol. 24, no. 3, pp. 42.

25. Selionov V. A., Ivanchenko Y. P., Solopova I. A., Gurfinkel V. S. *Tonic central and sensory stimuli facilitate involuntary airstepping in humans*, *J. Neurophysiol.*, 2009, vol. 101, pp. 2847.

26. Pavlovskii V. E., Pavlovskii V. V. *Modul'naya mikrokontroller'naya sistema upravleniya robotami ROBOKON-1*. Preprinty IPM im. M. V. Keldysha RAN, ISSN 2071–2898 (pechatnaya versiya) (Modular control system microcontroller robots ROBOCON-1. Preprints IPM RAS Keldysh, ISSN 2071–2898 (printed version)), 2012, no. 86, 32 p., available at: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-86>

27. Pavlovskii V. E., Pavlovskii V. V. *Masshtabiruemaya sistema upravleniya robotami ROBOKON-1* (Scalable Control System robot Robocop-1), *Informatsionno-Izmeritel'nye I Upravlyayushchie Sistemy*, 2013, no. 4, pp. 80–92.

28. Vukobratovich M. *Shagayushchie roboty i antropomorfnye mekhanizmy* (Walking robots and anthropomorphic mechanisms), Moscow, Mir, 1976.

29. Moskalenko V. V. *Elektricheskii privod* (Electric drive), Moscow Akademiya, 2007, 368 p.

30. Bashta T. M., Rudnev S. S., Nekrasov B. B. i dr. *Gidravlika, gidravlicheskie mashiny i gidravlicheskie privody* (Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic actuators), Moscow, Mashinostroenie, 1970, 504 p.

31. Skhirtladze A. G., Ivanov V. I., Kareev V. N. *Gidravlicheskie i pnevmaticheskie sistemy* (Hydraulic and pneumatic systems), Moscow, ITs MGTU "Stankin", "Yanus-K", 2003, 544 p.

32. Available at: <http://www.pneumax.ru/>

33. Dubrovskii V. I., Fedorova V. N. *Biomekhanika: Ucheb. dlya sred. i vyssh. ucheb. zavedenii* (Biomechanics: Proc. for medium and higher. Textbook, institutions), Moscow, VLADOS-PRESS, 2003, 672 p.

34. Pogorelov D. Yu. *O chislennykh metodakh modelirovaniya dvizheniya sistem tverdykh tel* (On numerical methods of solid bodies system motion simulation), *Zhurnal Vychislitel'noi Matematiki i Matematicheskoi Fiziki*, 1995, no. 4, pp. 501–506.

35. Simulink R2012b Documentation [Online], available at: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/ref/genericengine.html>



С 16 по 18 ноября 2016 г. в г. Тула на базе Тульского ГУ состоится
Международная научно-техническая конференция

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ (Интеллект 2016)



ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ, ПЛАНИРУЕМЫЕ ДЛЯ ОБСУЖДЕНИЯ

- Интеллектуальные системы поддержки принятия решений.
- Управление параллельными и распределенными информационными процессами.
- Методы цифровой обработки сигналов и изображений.
- Системы классификации и распознавания образов.
- Когнитивные технологии.
- Роевые технологии.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
<http://tsu.tula.ru/science/conferences/>

П. В. Аракчеев, Ph. D., зам. нач. отдела, arpv2002@inbox.ru,

В. Л. Безделов, науч. сотр., balery_wr@inbox.ru, **Е. В. Бурый**, д-р техн. наук, нач. отдела, buryi@bmstu.ru,
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана

Определение параметров релейного регулятора системы термостабилизации оптико-электронной аппаратуры, используемой при пониженных температурах окружающей среды

Рассмотрены особенности построения системы термостабилизации оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) с релейным регулятором, обеспечивающей функционирование ОЭА при пониженных температурах в условиях ограничения пространственных градиентов температур элементов ее конструкции. Изложена методика определения параметров регулятора, основанная на экспериментальном определении параметров электротепловых моделей ОЭА и последующей коррекции математических моделей, обеспечивающих уменьшение локальных ошибок аппроксимации температурных зависимостей. Экспериментально подтверждено, что определение параметров релейного регулятора в результате применения методов векторной оптимизации и анализа полученных результатов на основе множества Парето позволяет реализовать систему термостабилизации, обеспечивающую минимальное время прогрева ОЭА при выполнении всех заданных ограничений по градиентам температур конструкции ОЭА и минимальном числе включений нагревателя.

Ключевые слова: оптика, аппаратура, термостабилизация, физическая модель, релейный регулятор, множество Парето

Введение

Эксплуатация оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) нередко требует ее адаптации к применению при пониженных и отрицательных температурах окружающей среды T_0 . Термостабилизация ОЭА обеспечивается за счет применения электронагревателей (ЭН), располагаемых на элементах ее конструкции. Как правило, ЭН не удастся разместить так, чтобы обеспечить равномерный нагрев конструкции ОЭА. Поэтому наряду с достаточно часто предъявляемым требованием обеспечения минимального времени прогрева ОЭА возникает требование безусловного выполнения ограничений по значениям градиентов температур в пределах конструкции ОЭА как в процессе нагрева аппаратуры до рабочей температуры T_w , так и в процессе ее поддержания. Основываясь на выводах работ [1–3], можно заключить, что для решения поставленной задачи необходимо определить параметры системы термостабилизации ОЭА, при которых будут обеспечены:

- нагрев ОЭА до температуры T_w в течение минимально возможного интервала времени t_w ;
- допустимые значения градиентов температур в пределах конструкции ОЭА;
- требуемая надежность функционирования системы, исключая перегрев ОЭА, приводящий к необратимой деструкции оптоэлектронных компонентов.

В настоящее время с помощью электронных ключей можно обеспечить надежную коммутацию нагревателя, имеющего рабочее напряжение от 20 до 30 В при токе от 5 до 10 А. Дальнейшее увеличение мощности нагревателя приводит к существ-

венному росту вероятности отказа коммутирующего элемента, прежде всего, вследствие возможности теплового пробоя ключа. Кроме того, увеличение мощности нагревателя приводит к росту уровня помех в цепях низковольтной силовой сети, что может привести к нежелательному воздействию на бортовую аппаратуру. Использование в качестве источника энергии силовой сети с более высоким напряжением позволяет существенно увеличить энергетику нагревателя, однако, поскольку отказ электронного ключа может носить катастрофические последствия для функционирования ОЭА, в качестве коммутирующего элемента используют электромеханические реле. Это предопределяет применение в системе термостабилизации ОЭА регулятора релейного типа. В явном виде требования к его функционированию сформировать не удастся, поскольку априори известны только ограничения по параметрам состояния объекта управления — ОЭА, а не ограничения по управлению. В этой ситуации формальное применение методов теории оптимального управления [4] для определения параметров регулятора вызывает значительные трудности, что приводит к целесообразности создания методики, обеспечивающей получение эффективного конечного решения при минимизации затрат на его формирование.

Модель объекта управления

Моделирование тепловых процессов в элементах конструкции ОЭА представляет собой сложную в части создания адекватной модели теплопередачи и трудоемкую в части получения конечного

решения задачи. Основываясь на известном принципе электротепловой аналогии, для оценки параметров регулятора можно ограничиться рассмотрением достаточно общей модели объекта управления (рис. 1, а), которую будем называть электротепловой. Эта модель физична в плане описания энергетического баланса происходящих тепловых процессов и адекватна в плане описания изменения во времени t температур $T_1(t)$, $T_2(t)$, ..., $T_N(t)$ в точках 1, 2, ..., N конструкции ОЭА. Тип ЭН существенно влияет на вид переходной характеристики, поскольку скорости теплопередачи ЭН (трубчатых, пленочных и др.) различаются. Для учета этого фактора в состав модели введено звено запаздывания с параметром задержки τ [с].

Зная критичные по значению градиента температур T_{AB} точки A и B конструкции ОЭА, от достаточно сложного анализа общей электротепловой модели можно перейти к анализу совокупности двух частных электротепловых моделей А и В (рис. 1, б), описывающих временные зависимости температур $T_A(t)$ и $T_B(t)$. Ветвь $R_{OA}-C_{OA}$ цепи первой модели представляет тепловые процессы в основной части конструкции ОЭА, а ветвь R_A-C_A — тепловые процессы в той части конструкции, контролируемую температуру в точке A которой будем считать наибольшей. Ветвь цепи, содержащая сопротивление R_{AA} , моделирует передачу теплоты ОЭА в окружающее пространство. Ветви цепи второй модели представляют аналогичные процессы при контроле температуры точки B другой части этой же конструкции ОЭА. Следует отметить, что параметры элементов R_{AA} и R_{AB} обеих моделей в общем случае отличаются, хотя и близки.

Описывающие изменения токов в ветвях цепей электротепловых моделей А и В дифференциальные уравнения определяют напряжения $u_A(t)$ и $u_B(t)$, соответствующие значениям $T_A(t)$ и $T_B(t)$. Для модели А, применяя операторную форму записи, имеем

$$\begin{aligned} u_A(p) \left[\left(R_A + \frac{1}{pC_A} \right) \left(R_{OA} + \frac{1}{pC_{OA}} \right) + \right. \\ \left. + \left(R_A + \frac{1}{pC_A} \right) R_{AA} + \left(R_{OA} + \frac{1}{pC_{OA}} \right) R_{AA} \right] = \\ = I(p) \exp(-p\tau_A) \left(R_{OA} + \frac{1}{pC_{OA}} \right) \frac{1}{pC_A}, \end{aligned}$$

откуда получаем ее передаточную характеристику $H^A(p)$

$$H^A(p) = \frac{K^A (p - p_1^A) \exp(-p\tau_A)}{(p - p_2^A)(p - p_3^A)}, \quad (1)$$

$$\text{где } K^A = \frac{R_{AA} R_A C_A}{C_{OA} C_A (R_{OA} R_A + R_A R_{AA} + R_{AA} R_A)},$$

$p_1^A = \frac{-1}{R_A C_A}$, а p_2^A и p_3^A — корни характеристического уравнения

$$\begin{aligned} C_{OA} C_A (R_{OA} R_A + R_A R_{AA} + R_{AA} R_A) p^2 + \\ + C_{OA} C_A \left(\frac{R_A}{C_{OA}} + \frac{R_{OA}}{C_A} + \frac{R_{AA}}{C_{OA}} + \frac{R_{AA}}{C_A} \right) p + 1 = 0. \end{aligned}$$

Разделив выражение (1) на p и используя обратное преобразование Лапласа, получаем выражение для переходной характеристики электротепловой модели А, считая что $t' = t - \tau_A$:

$$\begin{aligned} h^A(t) = \left[\frac{p_1^A}{p_2^A p_3^A} + \frac{\exp(-p_2^A t')}{p_3^A - p_2^A} - p_1^A \frac{\exp(-p_2^A t')}{p_2^A (p_3^A - p_2^A)} + \right. \\ \left. + p_1^A \frac{\exp(-p_3^A t')}{p_3^A (p_3^A - p_2^A)} - \frac{\exp(-p_3^A t')}{p_3^A - p_2^A} \right] K^A. \end{aligned}$$

Аналогично определяется переходная характеристика $h^B(t)$ модели В, для которой

$$H^B(p) = \frac{K^B (p - p_1^B) \exp(-p\tau_B)}{(p - p_2^B)(p - p_3^B)}. \quad (2)$$

Характеристики $h^A(t)$ и $h^B(t)$ могут быть определены в результате использования метода спектрального анализа отклика объекта управления на импульсное воздействие [5] — включение ЭН мощностью W в течение такого интервала времени T_p , при котором частота, соответствующая первому минимуму спектра импульса воздействия, примерно в два раза превосходит частоту ω_ϕ , на которой фаза передаточной характеристики объекта становится равной $-\pi$. Величина W должна обеспечить такие точности оценок откликов — значений температуры, чтобы в результате деления спектра отклика объекта на спектр импульса воздействия по-

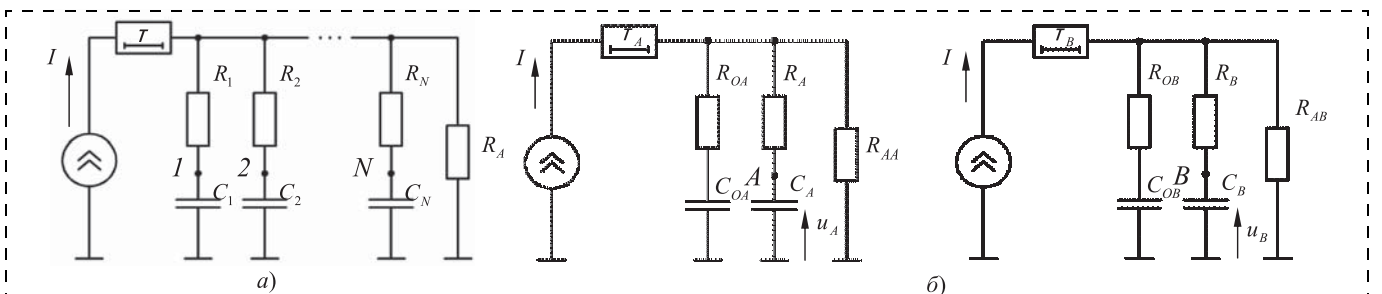


Рис. 1. Электротепловые модели ОЭА: модель общего вида (а); частные модели, обеспечивающие анализ температур двух точек конструкции ОЭА (б)

лучить состоятельные спектры импульсных характеристик объекта. Применение этого метода сопряжено с риском повреждения элементов ОЭА, поскольку T_p и W могут быть определены только экспериментально, а неконтролируемый нагрев ряда компонентов ОЭА может привести к их необратимым разрушениям. Определить $h^A(t)$ (и, соответственно, $h^B(t)$) можно, применив метод, заключающийся в нахождении параметров компонентов электротепловой модели путем решения задачи минимизации функционала

$$J^A = \int_0^{t_w} (aT_A(t) - u_A(t, R_A, R_{OA}, R_{AA}, C_A, C_{OA}, \tau_A))^2 dt \rightarrow \min, \quad (3)$$

$R_A, R_{OA}, R_{AA}, C_A, C_{OA}, \tau_A$

где a — коэффициент преобразования измеряемой температуры в напряжение, $T_A(t)$ — экспериментально зарегистрированный в точке A отклик ОЭА на воздействие, реализуемое при M включениях ЭН с периодом t_c , причем продолжительность каждого включения $t_h \ll \min(C_{OA}R_{OA}, C_AR_A)$, а $t_w = Mt_c$. Для корректной регистрации отсчетов $T_A(t)$ в процессе перераспределения теплоты между элементами конструкции ОЭА следует обеспечить выполнение условия $5t_h < t_c < 10t_h$. Начальное решение для задачи (3) определяется на основе приближений: $R_{AA} \approx R_{AB} \approx R_O$; $C_{OA} + C_A \approx C_O$; $C_OR_O = \tau_O$, где τ_O — экспериментально установленная постоянная времени охлаждения конструкции ОЭА, а величина C_O принимается равной ее теплоемкости. Аналогично (3) определяется $h^B(t)$, причем $C_{OB} + C_B \approx C_O$.

Экспериментальная оценка применимости математической модели (1) для описания $H^A(p)$ (и, соответственно, $H^B(p)$) реального объекта управления показала, что характер тепловых процессов удается представить с вполне удовлетворительной погрешностью, оцениваемой уровнем максимального значения ошибки 0,1 °C.

В качестве физической модели (ФМ) I конструкции ОЭА использовалась прямоугольная пластина из сплава Д16 с габаритными размерами 268 × 200 × 6 мм. На ней установлены (рис. 2, а) плоский толсто пленочный ЭН с $W = 148$ Вт и в точках A и B — два терморезистора, обеспечивающие погрешность оценок температур T_A и T_B менее 1 %. На рис. 3, а представлены экспериментально зарегистрированные отклики $T_A^I(t)$ и $T_B^I(t)$, являющиеся результатом теплового воздействия $w(t)$ ЭН, включаемого в соответствии с ранее сформулированными рекомендациями ($M = 5$, $t_h = 20$ с, $t_c = 220$ с). В табл. 1 приведены соответствующие этим реализациям параметры электротепловых моделей А и В (эффективным способом получения решений оказалось применение метода покоординатного спуска). На рис. 3, а

приведены итоговые модельные реализации $T_A^{\text{mod I}}(t) = w(t) \otimes \frac{dh_A^I(t)}{dt}$ и $T_B^{\text{mod I}}(t) = w(t) \otimes \frac{dh_B^I(t)}{dt}$ (символом " $\otimes$ " обозначена операция свертки). Они удовлетворительно согласуются с $T_A^I(t)$ и $T_B^I(t)$.

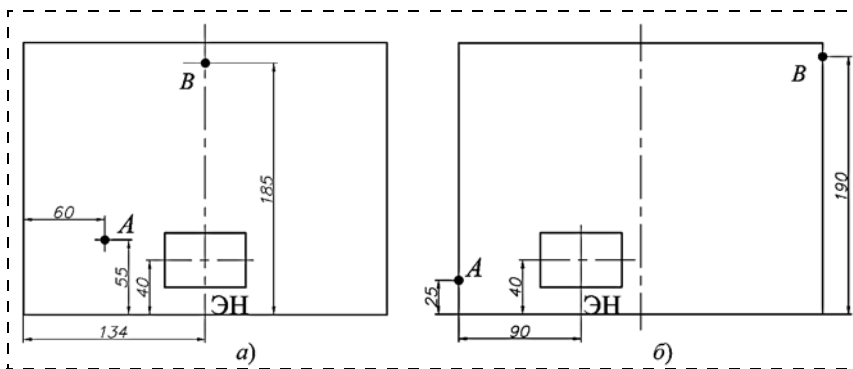


Рис. 2. Физические модели объекта управления: ФМ I (а) и ФМ II (б)

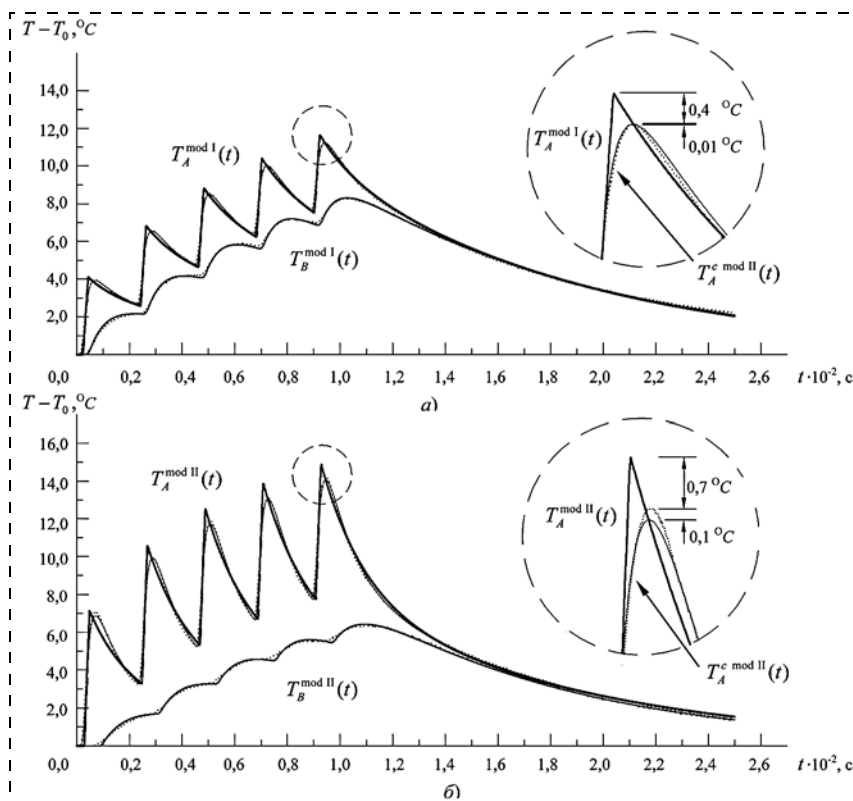


Рис. 3. Экспериментально зарегистрированные при одинаковых воздействиях $w(t)$ реализации $T_A^I(t)$, $T_B^I(t)$ и $T_A^{II}(t)$, $T_B^{II}(t)$ для ФМ I (а) и ФМ II (б) и соответствующие модельные реализации температур

Таблица 1

Параметры электротепловых моделей ФМ I и ФМ II

Электротепловые модели ФМ I				Электротепловые модели ФМ II				Размерность параметра
Модель A		Модель B		Модель A		Модель B		
R_{OA}	0,208	R_{OB}	0,257	R_{OA}	0,135	R_{OB}	0,390	Ом
R_A	0,443	R_B	0,003	R_A	1,090	R_B	0,007	
R_{AA}	1,078	R_{AB}	0,941	R_{AA}	1,090	R_{AB}	0,672	
C_{OA}	399	C_{OB}	533	C_{OA}	302	C_{OB}	380	Ф
C_A	399	C_B	472	C_A	334	C_B	792	
τ_A	23,5	τ_B	34,1	τ_A	28,6	τ_B	88,3	с
$J_{\min}^A$	77,9	$J_{\min}^B$	9,4	$J_{\min}^A$	278,6	$J_{\min}^B$	11,3	В ²

Для подтверждения общности описания объекта управления с использованием двух частных электротепловых моделей была сформирована ФМ II, отличающаяся от ФМ I расположением ЭН и терморезисторов (см. рис. 2, б). На рис. 3, б представлены отклики ФМ II $T_A^{\text{II}}(t)$ и $T_B^{\text{II}}(t)$, зарегистрированные при реализации такого же воздействия ЭН $w(t)$, как и при идентификации ФМ I. Удовлетворительные соответствия $T_A^{\text{modI}}(t)$, $T_A^{\text{I}}(t)$ и $T_A^{\text{modII}}(t)$, $T_A^{\text{II}}(t)$ (рис. 3), имеющие место при значительных отличиях характеристик асимметричных ФМ I и ФМ II, свидетельствуют о применимости предложенного способа формирования тепловых моделей для существенно различающихся по конструкции объектов управления.

Наибольшие ошибки аппроксимации $T_A(t)$ и $T_B(t)$ при использовании предложенных электротепловых моделей имеют место в тех интервалах времени, в пределах которых осуществляется передача теплоты от более нагретой части конструкции ОЭА к менее нагретой. Эти ошибки критичны при

построении регулятора, в котором используется разностный сигнал $T_{AB}(t) = T_A(t) - T_B(t)$: реализация условия $T_A^{\text{mod}}(t) - T_B^{\text{mod}}(t) \leq T_{AB \max}$ не позволит обеспечить минимально возможное значение времени нагрева t_w ОЭА до рабочей температуры T_w . Если реализация условия $t_w \rightarrow \min$ важна, можно осуществить коррекцию математических моделей путем введения дополнительных полюсов. Основываясь на выражении (1), например, для $H^{cA}(p)$, получим:

$$H^{cA}(p) = \frac{K^{cA}(p - p_1^{cA}) \exp(-p\tau_A^c)}{(p - p_2^{cA})(p - p_3^{cA})(p - p_4^{cA})}, \quad (4)$$

где p_4^{cA} — параметр введенного полюса. Такая коррекция возможна, поскольку параметры (4) могут быть определены путем решения задачи минимизации функционала вида

$$J^{cA} = \int_0^{t_{\text{work}}} (\alpha T_A(t) - u_A(t, K^{cA}, p_1^{cA}, p_2^{cA}, p_3^{cA}, p_4^{cA}, \tau_A^c))^2 dt \rightarrow \min, \quad (5)$$

который, по сути, аналогичен виду (3). Кроме того, коррекция оправдана, так как введение дополнительного полюса позволяет улучшить приближение $H^{cA}(p)$ в указанных интервалах времени. Аналогичные рассуждения справедливы и для модели B. Соответствующие экспериментальным данным $T_A^{\text{I}}(t)$ и $T_A^{\text{II}}(t)$ параметры $H^{cA}(p)$ и $H^{cB}(p)$, полученные в результате использования метода покоординатного спуска для поиска решения J^{cA} и J^{cB} , приведены в табл. 2. Применение скорректированных математи-

Таблица 2

Параметры математических моделей ФМ I и ФМ II

Математическая модель ФМ I				Математическая модель ФМ II			
Компоненты $H^{cA}(p)$		Компоненты $H^B(p)$		Компоненты $H^{cA}(p)$		Компоненты $H^B(p)$	
K^{cA}	$1,13 \cdot 10^{-4}$	K^B	$2,23 \cdot 10^{-5}$	K^{cA}	$1,80 \cdot 10^{-4}$	K^B	$4,09 \cdot 10^{-5}$
τ_A^c , с	12,5	τ_B , с	34,1	τ_A^c , с	16,2	τ_B , с	88,3
p_1^{cA}	$-6,02 \cdot 10^{-3}$	p_1^B	$-7,10 \cdot 10^{-1}$	p_1^{cA}	$-3,45 \cdot 10^{-3}$	p_1^B	$-1,94 \cdot 10^{-1}$
p_2^{cA}	$-1,00 \cdot 10^{-3}$	p_2^B	$-9,77 \cdot 10^{-4}$	p_2^{cA}	$-1,13 \cdot 10^{-3}$	p_2^B	$-1,18 \cdot 10^{-3}$
p_3^{cA}	$-9,32 \cdot 10^{-3}$	p_3^B	$-1,70 \cdot 10^{-2}$	p_3^{cA}	$-9,27 \cdot 10^{-3}$	p_3^B	$-1,00 \cdot 10^{-2}$
p_4^{cA}	$-6,70 \cdot 10^{-2}$	—	—	p_4^{cA}	$-5,47 \cdot 10^{-2}$	—	—
$J_{\min}^{cA}$, В ²	10,7	$J_{\min}^B$, В ²	9,4	$J_{\min}^{cA}$, В ²	22,0	$J_{\min}^B$, В ²	10,9

ческих моделей вида (4) позволяет построить модельные реализации $T_A^{c\text{mod}}(t)$ и $T_B^{c\text{mod}}(t)$, обеспечивающие меньшие значения $J_{\min}^{cA}$ и $J_{\min}^{cB}$, чем ранее полученные значения $J_{\min}^A$ и $J_{\min}^B$. Этот факт подтверждает свойство общности введенных математических моделей.

Нахождение решения (5) может оказаться невозможным в условиях отсутствия хорошего начального приближения. Для его поиска оправдано использование электротепловой модели А (и, соответственно, для нахождения решения J^{cB} — электротепловой модели В). Так как в целом ряде случаев локальные ошибки аппроксимации $T_B(t)$ при использовании (2) оказываются невелики, объект управления можно описать, применяя модели (2) и (4), и определять параметры регулятора, используя параметры этих моделей (табл. 2). При этом ошибки аппроксимации температурной зависимости $T_A(t)$ существенно уменьшаются (рис. 3).

Определение оптимальных параметров регулятора

Разность одновременно регистрируемых температур T_A и T_B в точках А и В конструкции РЭА пропорциональна величине W (при наличии теплопередачи в рассматриваемой системе), поэтому время нагрева ОЭА будет минимально при реализации условия $T_A - T_B = T_{AB\text{max}}$ в любой момент времени t . Таким образом, длительность сигнала включения реле определяется величиной $T_{AB}(t)$. Параметры регулятора — пороговое значение разности температур $T_{\max}^{th}$, по достижении которого ЭН будет отключен, и пороговое значение $T_{\min}^{th} < T_{\max}^{th}$, при достижении T_A которого после выключения ЭН он будет

снова включен, если $T_A < T_w$, должны удовлетворять условиям

$$T_{\max}^{th} < T_{AB\text{max}}; \quad (6)$$

$$0 < T_{\min}^{th} < T_{\max}^{th} - T_n, \quad (7)$$

где заданная величина T_n определяет устойчивость регулятора к воздействию электрических помех в канале измерения температуры.

Качество функционирования регулятора предложено оценивать, используя вектор $\mathbf{K}(M, t_w)$, определяемый в базе реализуемых пар значений параметров — числа включений M ЭН и соответствующего интервала времени t_w между моментом времени первого включения ЭН и моментом времени достижения заданного значения температуры T_w в точке А (или В) конструкции ОЭА. Оптимальные параметры регулятора определяются результатами выполнения процедуры векторной оптимизации

$$\mathbf{K}(M, t_w) \xrightarrow{T_{\min}^{th}, T_{\max}^{th}} \min, \quad (8)$$

которая может быть реализована в соответствии с рекомендациями работы [6].

Так, для ФМ I, анализируя множество решений, полученных методом прямого перебора параметров синтезируемого регулятора в окрестности предполагаемых решений, ограниченных условиями (6) и (7), шаг изменения параметров $T_{\min}^{th}$ и $T_{\max}^{th}$ целесообразно ограничить величиной 0,1 °С, что обусловлено реально достижимой точностью измерения температур T_A и T_B . Приняв $T_n = 0,5$, $T_{\max}^{th} \in [1,0; 1,1; \dots; 5,0]$, $T_{\min}^{th} \in [0,0; 0,1; \dots; T_{\max}^{th} - T_n]$ и $T_{AB\text{max}} = 7,0$ °С, получим множество решений (рис. 4, а), из которых

выберем наилучшее: $T_{\min}^{th} = 3,2$ °С,

$T_{\max}^{th} = 3,7$ °С, для которого $M = 9$ и $t_w = 1126$ с. Экспериментальная проверка функционирования регулятора с такими параметрами показала, что уточненную модель (4) объекта можно считать адекватной (рис. 5).

Итогом поиска $T_{\min}^{th}$ и $T_{\max}^{th}$, удовлетворяющих критерию (8), может стать множество решений, из которого необходимо выбрать то, которое в наибольшей степени соответствует достижению конечной цели — обеспечению надежной термостабилизации ОЭА при ее наискорейшем нагреве до рабочей температуры. Так, если для достаточно простых объектов — ФМ I и ФМ II — удастся выделить единственное решение (рис. 4, б), то решение задачи термостабилизации

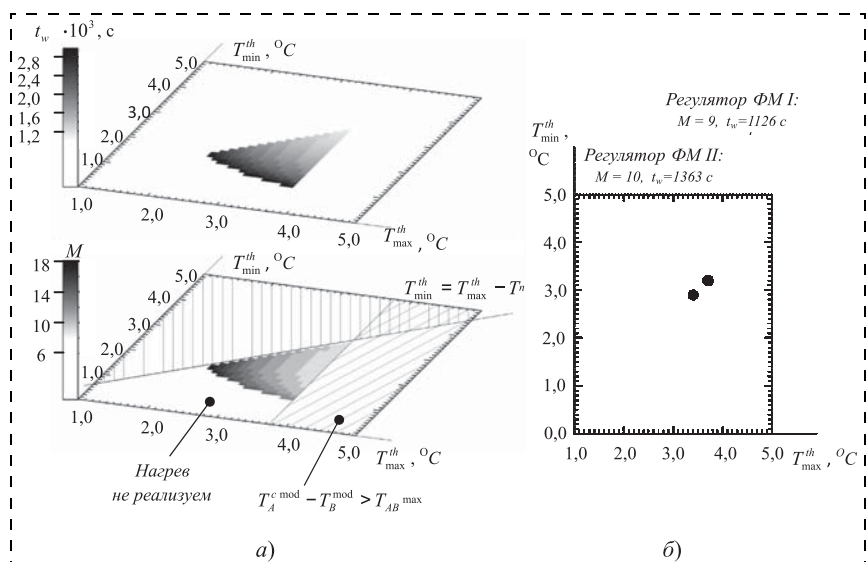


Рис. 4. Результаты расчета параметров регуляторов для систем термостабилизации ФМ I и ФМ II: множества допустимых решений для ФМ I (а); оптимальные по Парето параметры регуляторов релейного типа для ФМ I и ФМ II (б)

сложного объекта требует выбора решения из множества, содержащего десяток решений. В таких случаях эффективно использование решения, оптимального по Парето [6]. Отметим, что в общем случае систему параметров регулятора целесообразно расширить, введя в рассмотрение мощность W ЭН, что приводит к следующему представлению процедуры векторной оптимизации:

$$K(M, t_w) \xrightarrow{T_{\min}^{th}, T_{\max}^{th}, W} \min. \quad (9)$$

Методика определения параметров системы термостабилизации ОЭА и особенности технической реализации этой системы

Для нахождения параметров системы термостабилизации ОЭА, реализующей ограничения по значению градиента T_{AB} , должны быть выполнены следующие процедуры:

- рассчитана мощность W ЭН, который обеспечит нагрев ОЭА с температурой T_0 , до рабочей температуры T_w в течение интервала времени $\hat{t}_w$, по окончании которого ожидается готовность ОЭА к работе (оценка $\hat{W}$ может быть получена из соотношения $\hat{W} = (T_w - T_0) \bar{C} m / \hat{t}_w$, где $\bar{C}$ — оценка удельной теплоемкости ОЭА массой m , формируемая с учетом особенностей конструкции ОЭА);
- определены точки конструкции ОЭА — узлы крепления оптических элементов ОЭА и т.п., для которых нужно обеспечить минимальное значение градиента температур;
- экспериментально определены отклики $T_A(t)$ и $T_B(t)$ ОЭА на воздействие, реализуемое при M включениях ЭН с мощностью $W > \hat{W}$ (оценка $\hat{W}$ будет занижена из-за сложности правильного учета передачи теплоты от элементов конструкции ОЭА к внешним конструктивным элементам, поэтому целесообразно выбирать $W = (2...3) \hat{W}$);
- путем решения задач минимизации функционалов J^A и J^B определены параметры компонентов электротепловых моделей ОЭА, а также найдены параметры соответствующих математических моделей передаточных характеристик $H^A(p)$ и $H^B(p)$;
- определены параметры уточненных математических моделей передаточных характеристик $H^{cA}(p)$ и $H^{cB}(p)$ путем решения задач минимизации функционалов J^{cA} и J^{cB} с использованием в качестве начального приближения ранее найденных значений $K^A, \tau_A, p_1^A, p_2^A, p_3^A$ и $K^B, \tau_B, p_1^B, p_2^B, p_3^B$;
- определены параметры $T_{\min}$ и $T_{\max}$ регулятора в результате решения задачи оптимизации на основе векторного критерия (8).

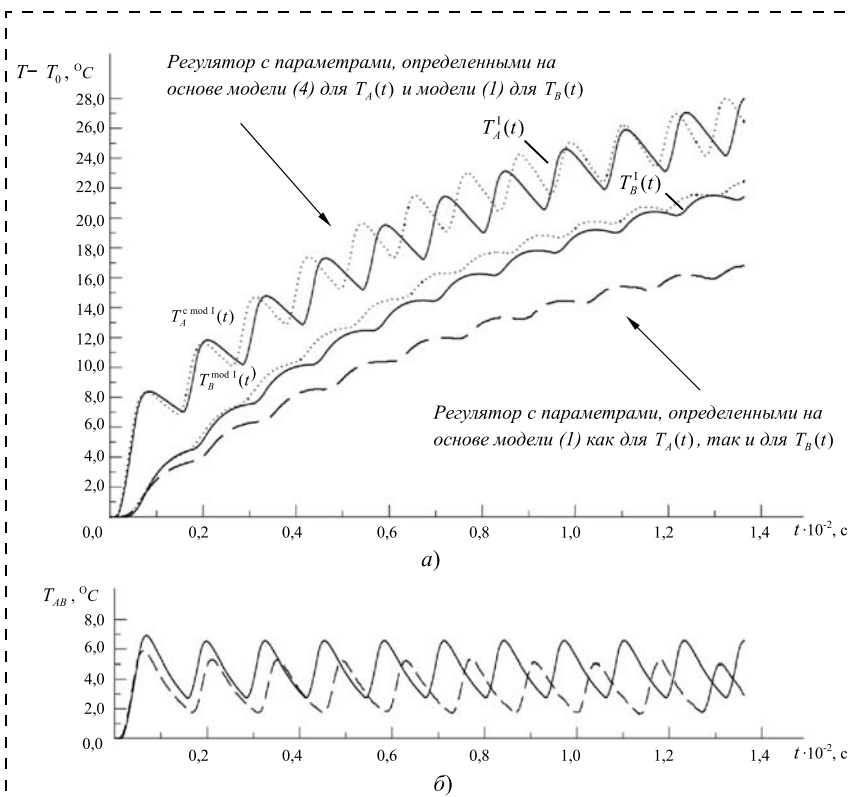


Рис. 5. Экспериментальные и модельные (точки) реализации температур в точках А и В ФМ I (а), характеризующие работу регуляторов с различными параметрами; разности температур в этих точках (б)

Надежность функционирования системы термостабилизации ОЭА зависит от ее технической реализации. В настоящее время с помощью электронных ключей можно обеспечить надежную коммутацию ЭН мощностью до 300 Вт, имеющих рабочее напряжение от 20 до 30 В и рабочий ток от 5 до 10 А (использование ЭН большей мощности оказывается технически нецелесообразным из-за необходимости увеличения классификационной мощности коммутирующего элемента). Применение ЭН, подключаемого к силовой сети с более высоким напряжением, позволяет существенно увеличить энергетику ЭН. В этом случае, однако, отказ электронного ключа может привести к катастрофическим последствиям — вплоть до выхода ОЭА из строя. Если значение W превышает несколько десятков ватт, в качестве коммутирующего элемента устройства управления ЭН оправдано использование электромеханического реле. Этот элемент позволяет реализовать величину $t_h \geq 1$ с, поэтому для увеличения ресурса работы системы термостабилизации целесообразно выполнить коррекцию параметров регулятора, обеспечив увеличение значения t_h .

Разработанная методика использована для построения системы термостабилизации твердотельного лазера "Имплан-10" с накачкой активного элемента излучением полупроводниковых лазеров [7]. Несмотря на сложность конструкции этой ОЭА (рис. 6, а, см. вторую сторону обложки) и существенное отличие направлений распространения

Заключение

Определение параметров регулятора релейного типа путем анализа результатов теплового воздействия на конструкцию ОЭА используемого в ее составе ЭН обеспечивает наряду с минимизацией трудозатрат на моделирование тепловых процессов в ОЭА минимизацию времени прогрева ОЭА при выполнении ограниченный по пространственным градиентам температур и повышенную надежность функционирования системы термостабилизации за счет минимизации числа включений ЭН.

Список литературы

1. Дубинский А. М., Панков Э. Д. Стендовые испытания и регулировка оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1986. 152 с.
2. Optoelectronic devices: Advanced Simulation and Analysis / Ed. J. Piprek. USA: Springer, 2005. 452 p.
3. Optomechanical Engineering Handbook / Ed. A. Ahmad. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. 416 p.
4. Понтягин Л. С., Болтянский В. Г., Гамкрелидзе Р. В., Мищенко Е. Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1983. 392 с.
5. Кузьмин М. П. Электрическое моделирование нестационарных процессов теплообмена. М.: Энергия, 1974. 416 с.
6. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 255 с.
7. Твердотельный лазер с полупроводниковой накачкой. Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана [Официальный сайт]. URL: http://llis.bmstu.ru/Твердотельный_лазер_с_полупроводниковой_накачкой (дата обращения: 25.12.2015).

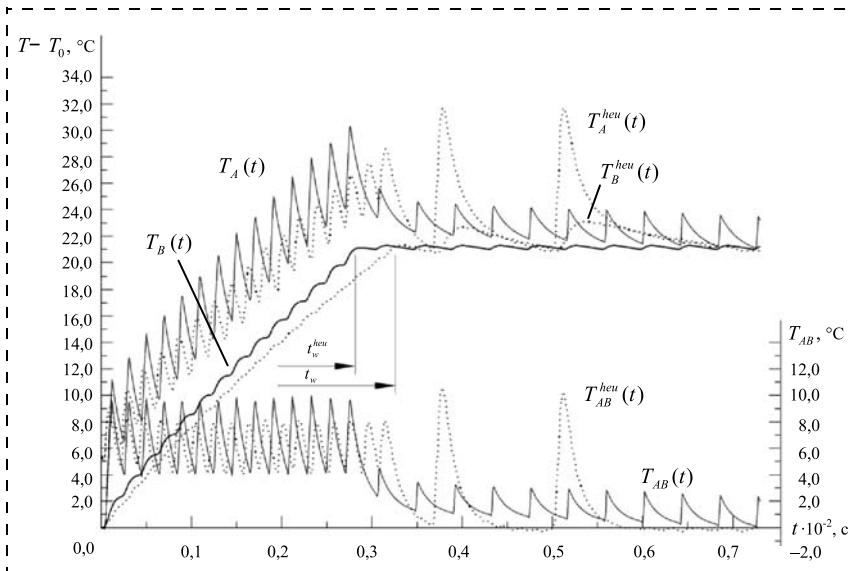


Рис. 7. Функционирование системы термостабилизации ОЭА "Имплан-10" с регулятором, реализующим эвристический алгоритм управления (точки), и с регулятором, параметры которого оптимальны по Парето

тепловых потоков от тех, которые имели место в исследованных ФМ I и ФМ II (рис. 6, б), экспериментально подтверждено обеспечение требуемого условия $T_{AB\max} < 10^\circ\text{C}$ в диапазоне температур окружающей среды от -40 до $+10^\circ\text{C}$ при использовании регулятора с рассчитанными параметрами $T_{\min}^{th} = 4,8$ и $T_{\max}^{th} = 5,4^\circ\text{C}$, соответствующих элементу множества Парето с $M = 14$ (рис. 7). Время нагрева ОЭА до $T_w = 21^\circ\text{C}$ оказалось почти на 15 % меньшим, чем величина t_w^{heu} , обеспечиваемая при реализации эвристического алгоритма управления, основанного на периодическом включении ЭН с $W = 900$ Вт в течение интервала времени $t_h = 8$ с.

Determination of the Relay Controller Parameters for the Optoelectronic Thermal Stabilization System Operating at Low Ambient Temperatures

P. V. Arakcheev, arpv2002@inbox.ru, V. L. Bezdelov, balery_wr@inbox.ru, E. V. Buryi, buryi@bmstu.ru✉, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Corresponding author: Buryi Evgeniy V., Professor, D. Sc., Head of Department, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation, e-mail: buryi@bmstu.ru, web: www.llis.bmstu.ru

Received on March 23, 2016

Accepted on April 04, 2016

This paper presents an approach to the design of a thermal stabilization system for the optoelectronic equipment (OEE) operating at low ambient temperatures and based on a relay controller. The main goal of the design procedure is minimization of the amount of the warm-up time t_w and the number of heater switchings. The constraints applied to the spatial gradients of the design elements should be taken into account in order to limit deformation of the OEE design. Since these constraints are applied only to the system state variables, the controller parameters' constraints cannot be explicitly formulated. We use the electro-thermal model for the object control in the design procedure. This model describes adequately the energy balance of the thermal processes and thermal responses $T_A(t)$, $T_B(t)$ in points A, B of the OEE design. Model approximation error is critical for the controller, which uses differential signal $T_{AB}(t) = T_A(t) - T_B(t)$ to fulfill the condition $t_w \rightarrow \min$. Experiments with physical models show that this error can be significantly decreased by introduction of additional poles of the transfer func-

tion. Pareto optimal relay controller parameters are determined as a result of solving the vector optimization problem, which minimizes the amount of OEE warm-up time and the number of the heater switchings. Experiments confirm the compliance of all the constraints applied to the temperature gradients of OEE design elements. The proposed technique was used for designing of the thermal stabilization system for a diode-pumped solid-state laser.

Keywords: optics, equipment, thermal stabilization, physical model, relay controller, Pareto optimality

For citation:

Arakcheev P. V., Bezdelov V. L., Buryi E. V. Determination of the Relay Controller Parameters for the Optoelectronic Thermal Stabilization System Operating at Low Ambient Temperatures, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 9, pp. 678—685.

DOI: 10.17587/mau.17.678-685

References

1. Dubinovskij A. M., Pankov E. D. *Stendovye ispytaniya i regulirovka optico-electronnykh priborov* (Bench testing and adjustment of optoelectronic devices), Leningrad, Mashinostroenie, 1996, 152 p. (in Russian).

2. Piprek J. ed. *Optoelectronic devices: Advanced Simulation and Analysis*, USA, Springer, 2005, 452 p.

3. Ahmad A. ed. *Optomechanical Engineering Handbook*, Boca Raton, CRC Press LLC, 1999, 416 p.

4. Pontryagin L. S., Boltyanskij V. G., Gamkrelidze R. V., Mishenko V. F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh processov* (Mathematical theory of optimal processes), Moscow, Nauka, 1983, 392 p. (in Russian).

5. Kuzmin M. P. *Electricheskoe modelirovanie nestacionarnykh processov teploobmena* (Electrical simulation of nonstationary heat exchange processes), Moscow, Energy, 1974, 416 p. (in Russian).

6. Podinovcky V. V., Nogin V. D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokriterial'nykh zadach* (Pareto-optimal solutions of multicriterion problems), Moscow, Nauka, 1982, 255 p. (in Russian).

7. **Diode-pumped** solid state laser Implan-10, available at: http://www.llis.bmstu.ru/Diode-pumped_solid_state_laser_Implan-10.

УДК 621.92

DOI: 10.17587/mau.17.685-689

И. С. Сидоров, аспирант, sidoov@rambler.ru, В. Е. Лысов, д-р техн. наук, проф., Самарский государственный технический университет

Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-слеящего электропривода на динамические показатели качества управления

Исследован процесс формирования погрешности в зависимости от частоты квантования цифровой части числового программного управления, реализующего программу движения подвижного органа станка. Проведено сравнение системы с непрерывным прототипом, принятым за идеал. Согласно проведенным исследованиям и с использованием теоремы Шеннона — Котельникова получено соотношение, которое позволяет повысить производительность технологических операций при обработке сложных профилей.

Ключевые слова: экстраполятор нулевого порядка, слеящий электропривод, дискретная система, система подчиненного регулирования, цифроаналоговый преобразователь, частота квантования, аналоговый прототип

Позиционно-слеящий электропривод нашел широкое применение в металлообработке, сборочных производствах, в сварочных процессах [1] для реализации перемещения подвижных узлов.

В предлагаемой статье анализируются динамические показатели качества управления в зависимости от частоты квантования цифровой части числового программного управления, реализующего программу движения подвижного органа станка [2]. Частота квантования определяется экстраполятором нулевого порядка, входящим в состав цифроаналогового преобразователя (ЦАП) [3]. Сравнение бу-

дем проводить с непрерывным прототипом системы. Структурная схема привода подачи строится по принципу систем с подчиненным регулированием [4] и включает контур тока, скорости и положения. Динамические показатели качества системы при технологических операциях обработки детали определяет контур положения. Структурная схема позиционно-слеящего электропривода, принятого в данном исследовании, показана на рис. 1 [5].

На рис. 1 обозначено: $W_{\text{экс}}(p)$ — передаточная функция экстраполятора нулевого порядка, K — коэффициент передачи аналоговой части системы, T_1 — постоянная времени оптимизированного контура положения, p — оператор Лапласа, $X_{\text{зд}}(p)$ — изображение заданного значения координаты, $X(p)$ — изображение ее фактического значения.

Анализ влияния частоты квантования особенно важен для прецизионных установок, например станков класса С при обработке сложных профилей, которые можно аппроксимировать фрагмен-

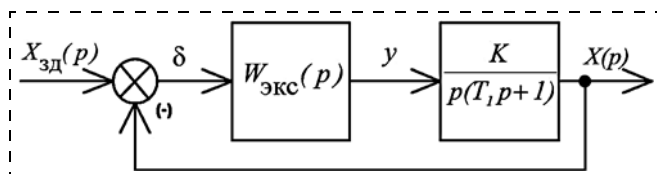


Рис. 1. Структурная схема электропривода

тами окружности радиусом 1...2,5 мм. Частота сигнала задания для электропривода подачи подвижного органа (например, салазок) $\omega_{зд}$ определяется следующим выражением:

$$\omega_{зд} = \frac{V_{зд}}{A_{зд}}, \quad (1)$$

где $V_{зд}$ — линейная скорость подвижного органа относительно инструмента, $A_{зд}$ — амплитуда. Например, для позиционно-следящего привода салазок станка модели 2440СФ4 линейная скорость подачи стола и салазок составляет $V_{зд} = 2$ м/мин при обработке легких материалов и $V_{зд} = 0,5$ м/мин — при обработке тяжелого материала. При $A_{зд} = 1...2,5$ мм согласно зависимости (1) весь спектр частот $\omega_{зд}$ для выполнения технологических операций с требуемыми технологическими скоростями $V_{зд}$ составляет от $8,3 \text{ с}^{-1}$ до $33,3 \text{ с}^{-1}$ (0,76...1,52 дек).

Сравним область частот сигнала задания с областью частот, ограниченной периодом частоты квантования экстраполятора нулевого порядка. Оценим влияние частоты квантования на устойчивость, воспроизведение сигнала задания, погрешность в воспроизведении сигнала задания. При исследовании используем Z -преобразование с последующим переходом в плоскость псевдочастот λ . Это дает возможность использовать амплитудно-частотные характеристики.

Передаточная функция рассматриваемой системы в разомкнутом состоянии в форме Z -преобразования имеет вид [6]

$$W_p(z) = \frac{K[z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(z - 1)(z - d)}, \quad (2)$$

где T — период частоты квантования экстраполятора; T_1 — постоянная времени апериодического звена непрерывной части системы; K — коэффициент передачи системы в разомкнутом состоянии; $d = e^{-\frac{T}{T_1}}$. Зависимость (2) позволяет оценить влияние T на устойчивость системы. Для оценки вос-

произведения сигнала задания необходимо анализировать передаточную функцию системы в замкнутом состоянии:

$$W_3(z) = \frac{W_p(z)}{1 + W_p(z)} = \frac{K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(Z - 1)(Z - d) + K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}. \quad (3)$$

Для оценки погрешности в воспроизведении сигнала задания необходимо анализировать передаточную функцию системы по ошибке:

$$W_\delta(z) = \frac{1}{1 + W_p(z)} = \frac{(Z - 1)(Z - d)}{(Z - 1)(Z - d) + K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}. \quad (4)$$

Зависимости (2)—(4) в полной мере способствуют анализу системы в области псевдочастот λ . Для этого в выражениях передаточных функций в форме Z -преобразования заменяем $Z = \frac{1 + w}{1 - w}$ и переходим к билинейному преобразованию, затем, заменяя $w = j\lambda \frac{T}{2}$, переходим в частотную плоскость в функции абсолютной псевдочастоты λ .

Следует отметить, что анализ амплитудно-частотных характеристик в области псевдочастот λ , полученных из выражений (2)—(4), в общем виде практически невозможно осуществить. Поэтому анализ будем проводить численным методом. Для этого было принято, что аналоговая система автоматического управления (САУ) имеет передаточную функцию в разомкнутом состоянии $W_p(p) = \frac{6,8}{p(0,8p + 1)}$ [5]. Значения периода частоты квантования экстраполятора выбирали в диапазоне: $T = 0,04 \text{ с}$; $0,08 \text{ с}$; $0,16 \text{ с}$; $0,3 \text{ с}$; $0,4 \text{ с}$; $0,45 \text{ с}$. При $T = 0,5 \text{ с}$ система становится неустойчивой. Результаты расчетов по зависимостям (2)—(4) для значения $T = 0,04 \text{ с}$ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Период дискретности экстраполятора "0" порядка T , с	Передаточная функция разомкнутой системы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{зд}(z)}$	Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы $W_p(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , с^{-1} ; K , дБ; T , с	Амплитудно-фазовая частотная характеристика замкнутой системы $W_3(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , с^{-1} ; λ , дек; K , дБ; T , с	Амплитудно-фазовая частотная характеристика системы по ошибке $W_\delta(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , с^{-1} ; K , дБ; T , с
0,04	$\frac{0,05(1,1Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,6)}$	$\frac{6,8(1 - j0,02\lambda)}{j\lambda(1 + 0,08\lambda)}$; $20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = \frac{1}{0,02} = 50$; $\lg 50 = 1,7$; $\lambda_2 = \frac{1}{0,08} = 12,5$; $\lg 12,5 = 1,097$	$\frac{1 - j0,02\lambda}{0,108^2(j\lambda)^2 + 0,127j\lambda + 1}$ $20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = \frac{1}{0,02} = 50$; $\lg 50 = 1,7$; $\lambda_2 = \frac{1}{0,108} = 9,26$; $\lg 9,26 = 0,966$; $c = 0,58$	$\frac{0,147j\lambda(1 + j\lambda 0,08)}{0,0108^2(j\lambda)^2 + 0,127j\lambda + 1}$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5$; $\lg 12,5 = 1,1$; $c \approx 0,58$; $\lambda_2 = \frac{1}{0,108} = 9,26$; $\lg 9,26 = 0,966$; $20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$

Период дискретности экстраполятора "0" порядка T , с	Передаточная функция разомкнутой системы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{3д}(z)}$	Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы $W_p(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , дек, K , дБ	Амплитудно-фазовая частотная характеристика замкнутой системы $W_3(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , дек, K , дБ	Амплитудно-фазовая частотная характеристика системы по ошибке $W_\delta(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , дек, K , дБ
0,08	$\frac{0,143(1,39Z+1)}{(Z-1)(Z-0,366)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 1,4$; $\lambda_2 = 1,065$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 1,4$; $\lambda_2 = 0,95$; $c \approx 0,51$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 1,1$; $\lambda_2 = 0,95$; $c \approx 0,51$
0,16	$\frac{0,325(1,88Z+1)}{(Z-1)(Z-0,13)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 1,097$; $\lambda_2 = 1,62$; $\lambda_3 = 0,98$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 1,1$; $\lambda_2 = 1,62$; $\lambda_3 = 0,935$; $c \approx 0,39$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 1$; $\lambda_2 = 0,935$; $c \approx 0,39$
0,3	$\frac{0,48(3,09Z+1)}{(Z-1)(Z-0,023)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 0,82$; $\lambda_2 = 0,8$; $\lambda_3 = 1,12$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 0,82$; $\lambda_2 = 0,96$; $\lambda_3 = 1,12$; $c \approx 0,35$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 0,8$; $\lambda_2 = 0,96$; $c \approx 0,35$
0,4	$\frac{0,52(4,21Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0066)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 0,7$; $\lambda_2 = 0,92$; $\lambda_3 = 0,7$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 0,92$; $\lambda_2 = 0,7$; $\lambda_3 = 1,16$; $c \approx 0,51$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 0,7$; $\lambda_2 = 1,17$; $c \approx 0,5$
0,45	$\frac{0,534(4,74Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0035)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 0,65$; $\lambda_2 = 0,84$; $\lambda_3 = 0,65$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 0,65$; $\lambda_2 = 0,84$; $\lambda_3 = 1,81$; $c \approx 2$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 0,65$; $\lambda_2 = 1,81$; $c \approx 2$
0,5	$\frac{0,54(5,33Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0019)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 0,77$; $\lambda_2 = 0,6$; $\lambda_3 = 0,6$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 0,77$; $\lambda_2 = 0,6$; $\lambda_3 = 1,11$; $c \approx 0,435$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 0,6$; $\lambda_2 = 1,11$; $c \approx 0,435$

Аналогично расчетам, сведенным в табл. 1, получены результаты для других периодов частоты квантования. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

По данным табл. 1, 2 на рис. 2 построены логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ) разомкнутой системы для выбранных значений T и ЛАФЧХ непрерывного прототипа.

ЛАФЧХ на рис. 2 показывает, что при $T = 0,16$ с запас устойчивости $\Delta\varphi$ снижается до 30° и не удовлетворяет техническим требованиям по запасу устойчивости ($45...60^\circ$).

Передаточная функция аналогового прототипа в замкнутом состоянии для целей сравнения с дискретной системой имеет вид

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{0,01166p^2 + 0,147p + 1}$$

Передаточная функция исследуемой системы по ошибке имеет вид

$$W_\delta(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{0,147p(0,08p + 1)}{0,01176p^2 + 0,147p + 1}$$

По данным расчетов, представленных в табл. 1, 2, на рис. 3, 4 представлены соответствующие логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) для выбранных значений T замкнутой системы и ЛАЧХ

позиционно-следающего электропривода по ошибке. ЛАЧХ на рис. 4 показывает, что при $T > 0,08$ с происходит существенное отличие в точности воспроизведения заданного сигнала от аналогового прототипа. Данный пример показывает, что наилучшее приближение дискретной САУ и аналогового прототипа происходит при $T \leq 0,08$ с или при

$$\frac{\omega_0}{\omega_c} \geq 12.$$

Поэтому для прецизионных позиционно-следающих систем допустимое отклонение частоты кван-

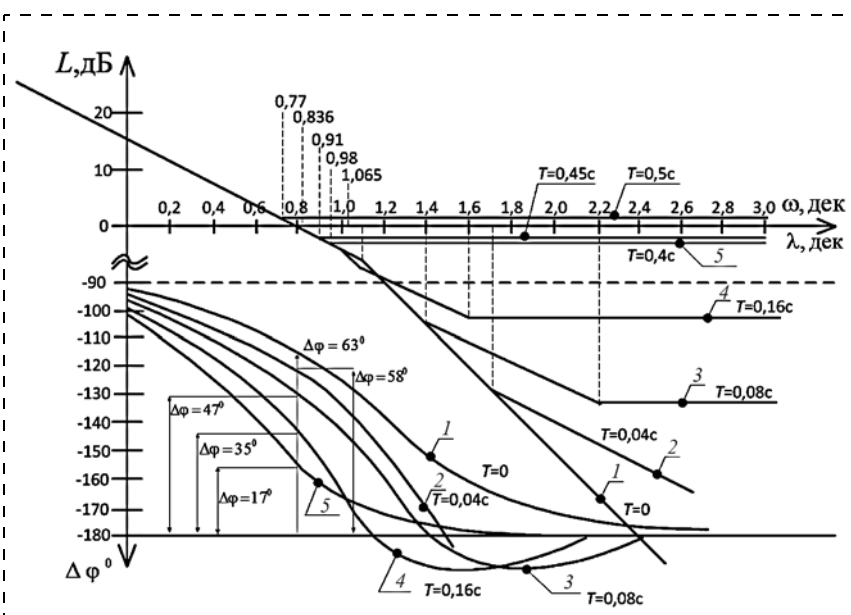


Рис. 2. ЛАФЧХ разомкнутой САУ с экстраполятором "0" порядка: 1 — ЛАФЧХ аналоговой САУ; 2 — ЛАФЧХ дискретной САУ с $T = 0,04$ с; 3 — ЛАФЧХ дискретной САУ с $T = 0,08$ с; 4 — ЛАФЧХ дискретной САУ с $T = 0,16$ с; 5 — ЛАФЧХ дискретной САУ с $T = 0,4$ с

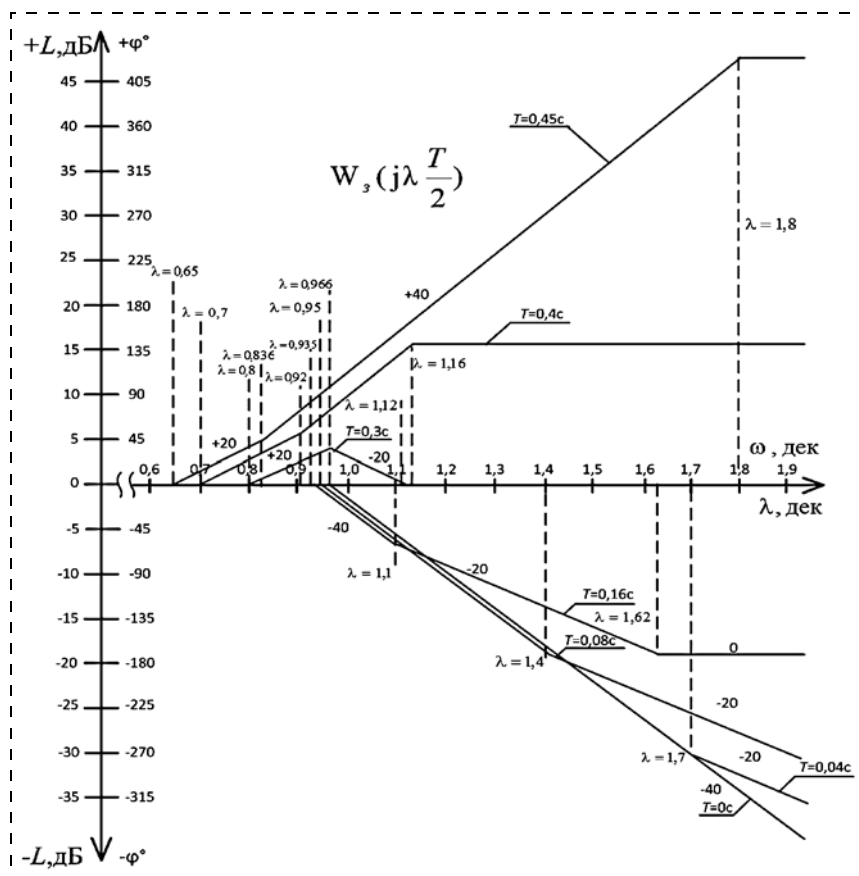


Рис. 3. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы: $T = 0$ — ЛАЧХ аналоговой САУ; $T = 0,04$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,04$ с; $T = 0,08$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,08$ с; $T = 0,16$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,16$ с; $T = 0,3$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,3$ с; $T = 0,4$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,4$ с; $T = 0,45$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,45$ с

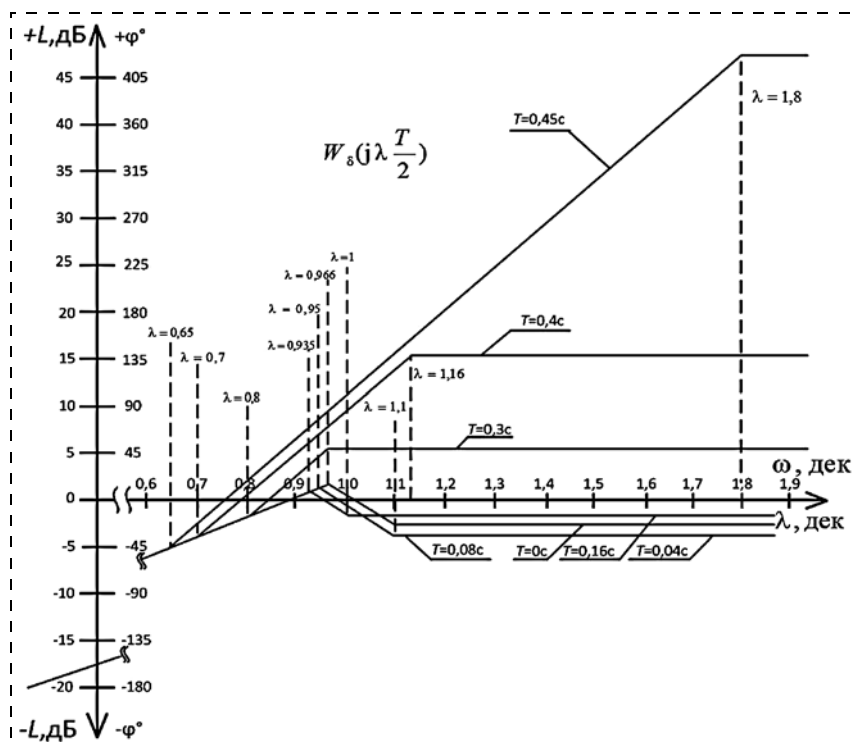


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика системы по ошибке

тования системы от аналогового прототипа требует более жесткого соотношения между ω_0 и ω_c . Согласно теореме Шеннона — Котельникова это должно быть соотношение $\omega_0 \geq 2\omega_c$ [6]. Как следует из приведенных результатов, для прецизионных систем это соотношение должно быть существенно большим.

Анализ ЛАЧХ, представленных на рис. 4 (обозначения, как и на рис. 3), показывает, что значение ошибки в отработке сигнала задания в упомянутом выше диапазоне частот удовлетворяет техническим требованиям при частоте квантования $T \leq 0,08$ с

или при отношении $\frac{\omega_0}{\omega_c} \geq 12$.

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Для повышения производительности технологических операций при обработке сложных профилей необходимо для поддержания постоянной скорости обработки увеличивать частоту ω_0 (уменьшать период частоты квантования экстраполятора), реализуя соотношение $\frac{\omega_0}{\omega_c} \geq 12$.
2. При повышении быстродействия аналоговой части системы необходимо пропорционально увеличивать частоту ω_0 экстраполятора нулевого порядка.

Список литературы

1. Лебедев М. Н., Орлова Р. Т., Пальцев А. В. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. М.: Энергоиздат, 1988. 223 с.
2. Xun W. Xu., Stephen T. Newman. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent — a review of the technologies. Computers in Industry. 2006. Vol. 12. N. 2. P. 141—152.
3. William Bolton. Instrumentation and Control Systems (Second Edition). Newnes, 2015. P. 281—302.
4. Рапопорт Э. Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Конспект лекций. Куйбышев, 1985. 56 с.
5. Лысов В. Е., Сидоров И. С. Анализ устойчивости позиционно-следящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулевого порядка // Вестник СамГТУ. Сер. "Технические науки". 2015. № 3 (47). С. 142—148.
6. Лысов В. Е. Теория автоматического управления. М.: Машиностроение, 2010. 500 с.

Analysis of the Influence of the Sampling Rate Position Regulator of the Position Servo Electric Drive on the Dynamic Parameters of the Quality Control

I. S. Sidorov, sidoov@rambler.ru, V. E. Lysov,
Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation

Corresponding author: Sidorov Igor S., Postgraduate Student,
Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation,
e-mail: sidoov@rambler.ru

Received on April 04, 2016

Accepted on June 21, 2016

The paper studies the stability and dynamic quality parameters of the control of the digital positional precision electric drive depending on the frequency of the digital part quantization of the numerical control. The drive provides a program of movement and positioning precision of the movable body of the machine. Structurally, the digital actuator is designed as a three-loop system of subordinate regulation: current loop, speed loop and position loop. The astatic position loop has the greatest sampling period of the digital part of the system. The article analyzes the influence of the minimum programmable movement in the astatic position loop with the minimized power and speed on stability of the system circuits and the quality control indicators: deregulation and transition time. It also analyzes the stability of the sampled-data system on the transfer-function for the system in the open position in the form of Z-transformation based on the Shannon—Kotelnikov theorem. Herewith, there is an analysis of the reproduction accuracy of the given difficult path by the approximated part of a small radius circle and a playback accuracy analysis. The analysis is based on the study of the transfer function of the system in the closed state and the error transfer function state, respectively, in the form of Z-transformation. Z-transformation and bilinear transformation make it possible to analyze the processes in the system in the field of pseudo-frequencies and to present the results of the research in the form of a logarithmic amplitude—phase—frequency characteristic. These characteristics clearly and convincingly demonstrate the impact of the minimal programmable movement of the system on the dynamic quality indicators control in comparison with the analog prototype. The study clarified the relationship between the sampling rate of the digital portion of the frequency and bandwidth of the analog part of the system, providing the required accuracy of a complex trajectory of the movable part of the machine. In order to improve the performance of the technological operations it is necessary to maintain a constant and optimal processing speed for the given work material, which is possible by increasing the frequency of a digital quantization of the system in the function of the parameters of the motion path.

Keywords: zero order hold device, servo drive, discrete system, slave control system, digital-to-analog converter, sampling rate, analog prototype, Z-transformation, numerical control

For citation:

Sidorov I. S., Lysov V. E. Analysis of the Influence of the Sampling Rate Position Regulator of the Position Servo Electric Drive on the Dynamic Parameters of the Quality Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 685—689.

DOI: 10.17587/mau.17.685-689

References

1. Lebedev M. N., Orlova R. T., Pal'cev A. V. *Sledjashhie jelektrprivody stankov s ChPU* (Follow-up motors CNC), Moscow, Jenergoizdat, 1988, 223 p. (in Russian).
2. Xun W. Xu., Stephen T. Newman. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent — a review of the

technologies, *Computers in Industry*, 2006, vol. 57, no. 2, pp. 141—152 (in Russian).

3. William Bolton. *Instrumentation and Control Systems* (Second Edition), Newnes, 2015, pp. 281—302.

4. Rapoport Je. Ja. *Sistemy podchinennogo regulirovanija jelektrprivodov postojannogo toka. Konspekt lekcij* (Slave systems control electric DC. Lecture notes), Kujbyshev, 1985, pp. 56 (in Russian).

5. Lysov V. E., Sidorov I. S. *Analiz ustojchivosti pozicionno-sledjashhego jelektrprivoda s uchetom diskretnosti jekstrapoljatora nulevogo porjadka* (Stability Analysis of position — servo actuator based on discreteness extrapolator zero order), *Vestnik SamGTU. Serija "Tehnicheskie nauki"*, 2015, no. 3 (47), pp. 142—148 (in Russian).

6. Lysov V. E. *Teorija avtomaticheskogo upravlenija* (Automatic Control Theory), Moscow, Mashinostroenie, 2010, 500 p. (in Russian).



15-я Международная конференция "АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА"

Москва, 14—18 ноября 2016 г.



В рамках III Международной недели авиакосмических технологий "Aerospace Science Week" Московский авиационный институт (НИУ) проводит 15-ю Международную конференцию "Авиация и космонавтика" с целью расширения способов и инструментов научного взаимодействия, выявления новых научно-технических результатов в области авиации и космонавтики, определения новых "точек роста" и прорывных технологий авиакосмической отрасли, выработки стратегии развития отраслевого уровня.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
www.mai.ru/science/aerospace

А. И. Андриянов, канд. техн. наук, доц., mail@ahaos.ru,
Д. Ю. Михальцов, студент, blackhero2006@yandex.ru,
Брянский государственный технический университет

Экспериментальное исследование нелинейной динамики импульсных преобразователей напряжения с системой управления на основе метода направления на цель¹

Рассматривается система управления непосредственным понижающим преобразователем напряжения на основе метода направления на цель. Приводится математическая модель системы в форме стробоскопического отображения. Построены карты динамических режимов и диаграммы относительного размаха колебаний, позволяющие оценить нелинейные динамические свойства системы. Приводится функциональная схема экспериментальной установки, позволяющей проводить исследования нелинейной динамики замкнутых импульсных систем автоматического управления с различными видами широтно-импульсной модуляции. Показана эффективность метода направления на цель при управлении нелинейной динамикой как при численном моделировании, так и при экспериментальном исследовании.

Ключевые слова: источник питания, транзисторный преобразователь, нелинейная динамика, бифуркация, метод направления на цель, широтно-импульсная модуляция

Введение

Импульсные источники питания (ИИП) широко применяются в радиоэлектронной технике, поскольку обладают приемлемыми техническими характеристиками и массогабаритными показателями [1]. Наряду с указанными преимуществами данный тип источников обладает и недостатком, связанным с распространением помех в питаемую систему. Это обусловлено наличием высокочастотной составляющей напряжения на выходе с частотой, равной частоте преобразования. В ИИП на сегодняшний день наиболее широко применяется широтно-импульсная модуляция (ШИМ), реализуемая транзисторными преобразователями напряжения. Такого рода устройства являются системами автоматического управления (САУ), где применяется обратная связь для стабилизации выходного напряжения.

Как показывает практика, при работе импульсных систем электропитания за счет дрейфа параметров на выходе возможно возникновение колебаний с частотой, отличной от частоты ШИМ, а также квазипериодических и хаотических колебаний. Данные колебания часто имеют достаточно большую амплитуду, что ведет к перегрузке полупроводниковых приборов, а также росту уровня помех, распространяемых в нагрузку. При проектировании таких систем основной задачей является исключение этих колебаний при работе устройства в целях повышения качества выходного напряжения. Природа этих колебаний связана с динамическими нелинейностями замкнутых импульсных систем, что требует при их проектировании так называемого бифуркационного подхода, базирующегося

на теории нелинейной динамики, теории бифуркаций и хаоса [2, 3].

На сегодняшний день устранение указанных колебаний осуществляется на основе параметрического синтеза, когда выбирается такой набор параметров системы, который полностью исключает возможность возникновения сложных динамических процессов. Однако в данном случае часто возникает противоречие, когда набор параметров, обеспечивающий заданные нелинейные динамические свойства системы, ведет к падению точности поддержания выходного напряжения или к росту динамических потерь в ключах за счет повышенных частот коммутации. Указанное противоречие может быть устранено за счет так называемого структурного синтеза, когда выбирается определенная структура системы управления и алгоритм ее работы, обеспечивающие желаемый динамический режим. Под желаемым динамическим режимом работы системы будем понимать режим, при котором частота колебаний выходного напряжения равна частоте ШИМ и мала их амплитуда [2]. В литературе, посвященной нелинейной динамике полупроводниковых преобразователей, такой режим носит название 1-цикла. Также возможно возникновение m -циклов, когда частота колебаний выходного напряжения в m раз меньше, чем частота ШИМ. Показатель m в дальнейшем будет называться *кратностью цикла*.

Теории управления нелинейной динамикой дискретных систем и импульсных преобразователей, в частности, большое внимание уделяется в зарубежной литературе. Магистральными направлениями развития теории управления нелинейной динамикой является метод линеаризации отображения Пуанкаре [4, 5] и метод с запаздывающей обратной связью (метод Пирагаса) [6–9]. Также перспективным методом является метод направления на цель

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-08-31126).

(МНЦ) [10], который был адаптирован автором для управления импульсным преобразователем постоянного напряжения [11]. Основным эффектом применения указанных методов является обеспечение желаемого динамического режима системы в тех областях параметров, в которых наблюдаются нежелательные динамические режимы. Однако за рамками работы [11] осталось экспериментальное подтверждение полученных результатов, что является основной задачей данной работы.

Система управления непосредственным понижающим преобразователем напряжения

В настоящее время наиболее распространенным классом транзисторных преобразователей постоянного напряжения, применяемых при построении импульсных источников питания, являются преобразователи первого рода [12]. Самой известной схемой, относящейся к данному классу, является непосредственный понижающий преобразователь, который реализует однополярную неинверсивную модуляцию [13].

Функциональная схема системы управления (СУ) непосредственным понижающим преобразователем постоянного напряжения на основе МНЦ с ШИМ первого рода (ШИМ-I) [3] представлена на рис. 1. Она аналогична СУ с ШИМ-II, рассмотренной в работе [11]. Выбор ШИМ-I для анализа в рамках данной работы обусловлен ее широким распространением в микропроцессорных системах управления.

На рис. 1 приняты следующие обозначения: R — активное сопротивление дросселя; L — индуктивность дросселя; C — емкость конденсатора; R_L — сопротивление нагрузки; U_{in} — напряжение источника питания; β — масштабный коэффициент цепи обратной связи; β_1, β_2 — масштабные коэффициенты; U_{ref} — напряжение задания; U_p — импульсы управления силовым ключом; U_{con} — управляющий сигнал; U_r — развертывающее пилообразное напряжение; GCS — основная система управления; VT — силовой транзистор; VD — силовой диод; ACS — вспомогательная система управления; MC — задающий генератор; RG — генератор развертывающего напряжения; $SH, SH1, SH2$ — устройства выборки-хранения; $SB1, SB2$ — вычитатели; x_{1kref}, x_{2kref} — компоненты вектора задания $\mathbf{X}_{kref}$ на неподвижную точку 1-цикла на k -м тактовом интервале ШИМ; $CSP1, CSP2$ — вычислители x_{1kref}, x_{2kref} ; CRL — вычислитель сопротивления нагрузки; K_1, K_2 — коэффициенты пропорциональности; U_{err} — ошибка GCS ; x_{1clk}, x_{2clk} — компоненты вектора обратных связей по переменным состояниям в стробоскопические моменты времени $\mathbf{X}_{clk}$; u_{1k}, u_{2k} — компоненты вектора корректирующих воздействий $\mathbf{U}_k$.

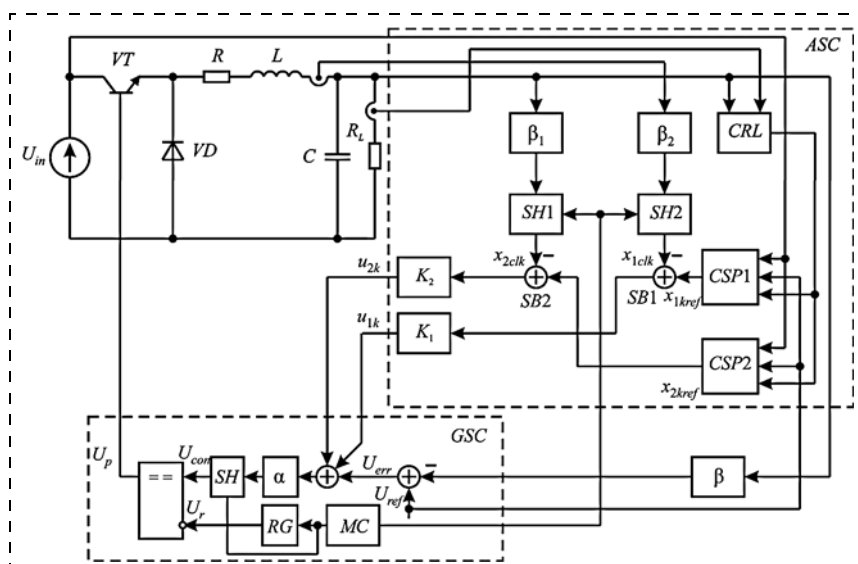


Рис. 1. Система управления импульсным преобразователем напряжения на основе метода направления на цель

В представленной на рис. 1 СУ можно выделить две подсистемы. Основная система управления (GSC) обеспечивает стабилизацию среднего значения выходного напряжения без учета нелинейных динамических свойств, а вспомогательная система управления (ASC) обеспечивает стабилизацию проектного динамического режима (1-цикла).

Переменные состояния в стробоскопические моменты времени x_{1bk}, x_{2bk} , масштабированные с коэффициентами β_1 и β_2 соответственно, запоминаются с использованием устройств выборки-хранения $SH1$ и $SH2$. Запоминание происходит в начале каждого тактового интервала при подаче на $SH1$ и $SH2$ стробирующего импульса с задающего генератора MC . С помощью вычитателей ($SB1$ и $SB2$ на рис. 1) рассчитывается отклонение текущего положения точки отображения от заданного с последующим масштабированием с коэффициентами K_1 и K_2 соответствующих компонент вектора рассогласования $\Delta \mathbf{X} = [\Delta x_{1k}, \Delta x_{2k}]^T$. Компоненты вектора задания на неподвижную точку x_{1kref}, x_{2kref} рассчитываются с помощью блоков $CRL1, CRL2$ [11]. Вычисленные корректирующие воздействия u_{1k} и u_{2k} суммируются с напряжением ошибки основной системы управления U_{err} , вызывая на каждом тактовом интервале стабилизирующее проектный режим приращение коэффициента заполнения ШИМ. При установлении в системе желаемого 1-цикла $u_{1k} = u_{2k} = 0$.

Математическая модель системы

Дискретная система автоматического управления с ШИМ, рассматриваемая в данной работе, описывается кусочно-гладкой системой дифференциальных уравнений с разрывной правой частью [2]. На каждом участке гладкости движения описываются системой линейных дифференциальных уравнений.

В теории нелинейной динамики для описания дискретных систем широко используются так называемые стробоскопические отображения [14]. Для рассматриваемой системы стробоскопическое отображение, связывающее вектор переменных состояния в конце k -го тактового интервала ($\mathbf{X}_k$) с вектором переменных состояний в начале k -го тактового интервала ($\mathbf{X}_{k-1}$), имеет вид [15]

$$\begin{aligned}\mathbf{X}_k &= \Psi(\mathbf{X}_{k-1}) = \\ &= \mathbf{e}^{\mathbf{A}_3(1-z_{k2})a} \mathbf{e}^{\mathbf{A}_2(z_{k2}-z_{k1})a} \mathbf{e}^{\mathbf{A}_1 z_{k1}a} \mathbf{X}_{k-1} + \\ &+ \mathbf{e}^{\mathbf{A}_3(1-z_{k2})a} \mathbf{e}^{\mathbf{A}_2(z_{k2}-z_{k1})a} (\mathbf{e}^{\mathbf{A}_3 z_{k1}a} - \mathbf{E}) \mathbf{V}_{AB1} + \\ &+ \mathbf{e}^{\mathbf{A}_3(1-z_{k2})a} [\mathbf{e}^{\mathbf{A}_2(z_{k2}-z_{k1})a} - \mathbf{E}] \mathbf{V}_{AB2} + \\ &+ (\mathbf{e}^{\mathbf{A}_3(1-z_{k2})a} - \mathbf{E}) \mathbf{V}_{AB3},\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{E}$ — единичная матрица; $\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_L} \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{CR_L} \end{bmatrix}, \mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{CR_L} \end{bmatrix} — матрицы пара-$$

метров системы на 1-, 2- и 3-м участках гладкости

соответственно; $\mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} U_{in}/L \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ —

векторы вынуждающих воздействий на 1-, 2- и 3-м участках гладкости соответственно; $\mathbf{V}_{ABi} = \mathbf{A}_i^{-1} \mathbf{B}_i$,

$i = 1, 2, 3$; $z_{k1} = \frac{t_{k1} - (k-1)a}{a}$ — момент коммутации

силового ключа в относительном времени; $z_{k2} = \frac{t_{k2} - (k-1)a}{a}$ — момент коммутации силового ди-

ода в относительном времени [13]; t_{k1} , t_{k2} — первый и второй моменты коммутации соответственно в абсолютном времени. Как известно, момент t_{k1} связан с коммутацией силового ключа, а момент t_{k2} связан с коммутацией силового диода при работе преобразователя в режиме прерывистых токов [15].

Момент коммутации силового ключа в относительном времени может быть найден из трансцендентного уравнения $\xi_{k1}(\mathbf{X}, z_{k1}) = 0$, где функция $\xi_{k1}(\mathbf{X}, z_k)$ для СУ с ШИМ-I на основе МНЦ имеет вид

$$\xi_{k1}(\mathbf{X}, z_{k1}) =$$

$$= \alpha(U_{ref} - \beta \mathbf{C}_1^T \mathbf{X}_{k-1} + u_{1k} + u_{2k}) - U_{rm} z_{k1}, \quad (2)$$

где $\mathbf{C}_1 = [0; 1]$ — постоянный вектор, определяющий компоненту вектора переменных состояния, участвующую в выражении (в данном случае — напряжение на конденсаторе), U_{rm} — амплитуда разрывывающего напряжения.

Корректирующие воздействия, входящие в соотношение (2), вычисляются на основе выражений:

$$\begin{aligned}u_{1k} &= K_1(x_{1kref} - x_{1clk}); \\ u_{2k} &= K_2(x_{2kref} - x_{2clk}).\end{aligned}\quad (3)$$

Момент коммутации силового диода z_{k2} может быть найден из уравнения $\xi_{k2}(\mathbf{X}, z_{k2}) = 0$, где функция $\xi_{k2}(\mathbf{X}, z_{k2})$ определяется по выражению [15]

$$\xi_{k2}(\mathbf{X}, z_{k2}) = \mathbf{C}_2^T \mathbf{X}_{tk2}(\mathbf{X}_{tk1}, z_{k2}), \quad (4)$$

$\mathbf{C}_2 = [1; 0]$ — постоянный вектор, определяющий компоненту вектора переменных состояния; $\mathbf{X}_{tk1}$ и $\mathbf{X}_{tk2}$ — векторы фазовых переменных в 1-й и 2-й моменты коммутации соответственно.

Математическое моделирование системы управления нелинейной динамикой непосредственного понижающего преобразователя напряжения

Моделирование проводили для системы со следующими параметрами: $U_{in} = 5,1$ В, $L = 0,0036$ Гн, $C = 3,3$ мкФ, $R = 0,75$ Ом, $R_L = 10$ Ом, $\beta = 0,924$, $U_{rm} = 5$ В, $a = 0,0001$ с.

На рис. 2 приведены карты динамических режимов и диаграммы относительного размаха колебаний выходного напряжения ΔU_{rel} в пространстве двух параметров системы.

На картах символами Π_{ij} отмечены области существования различных динамических режимов (i — m -цикл, характерный для данной области, j — номер области на карте динамических режимов). В частности, область $\Pi_{1,1}$ представляет собой первую область существования желаемого режима с частотой $f = f_q$ (1-цикл), где $f_q = 1/a$ — частота квантования. Области $\Pi_{X,j}$ соответствуют недетерминированным режимам функционирования преобразователя ($m \rightarrow \infty$).

Относительный размах колебаний определяется как $\Delta U_{rel} = \Delta U / \Delta U_{1max}$, где ΔU_{1max} — максимальный размах колебаний в области параметров, соответствующих желаемому режиму (1-циклу); ΔU — абсолютный размах колебаний. Анализируя данную диаграмму, можно оценивать опасность той или иной области пространства параметров.

Анализ рис. 2, а показывает, что при больших значениях коэффициента усиления пропорционального регулятора ($\alpha > 7$) в системе наблюдаются нежелательные динамические режимы с большой амплитудой колебаний. Относительный размах колебаний в той или иной области параметров можно увидеть на рис. 2, б. Как видно из рис. 2, максимальное его значение достигает 8,3 при $U_{ref} = 4,5$ В и $\alpha = 20$.

При работе в режиме, соответствующем 1-циклу, относительный размах колебаний минимален. Площадь области существования желаемого 1-цикла в рассматриваемом случае составляет 31,9 % от площади карты. Области $\Pi_{3,1}$ и $\Pi_{6,1}$ на карте выглядят неоднозначно, поскольку являются областями мульт-

тистабильности, где наряду с 3-циклом и 6-циклом устойчивым является и 1-цикл. Области хаотических колебаний на карте отмечены серым цветом и составляют 37,1 % от площади карты.

Применение МНЦ с параметрами: $K_1 = 0$, $K_2 = -0,7$, $\beta_1 = 0$, $\beta_2 = 0,924$ дает существенное увеличение площади области существования желаемого 1-цикла. Как следует из рис. 2, в, указанная площадь составляет 98,8 % от площади карты. При этом нежелательные динамические режимы остаются при больших задающих воздействиях и больших значениях коэффициента α . Здесь наибольшей площадью обладают область существования 5-цикла и область существования хаотических колебаний. Также существенно снижается и максимальное значение относительного размаха колебаний, которое, как видно из рис. 2, г, составляет 1,7.

На рис. 3 представлены бифуркационные диаграммы, соответствующие картам динамических режимов на рис. 2. Диаграммы на рис. 3, а, б построены при $U_{ref} = 2,46$ В, а диаграммы на рис. 3, в, г — при $U_{ref} = 3,96$ В.

Как видно из рис. 3, а, первая точка бифуркации связана с суперкритической бифуркацией [14], которая сопровождается мягким удвоением периода при $\alpha_1 = 12,52$. Начиная с $\alpha_2 = 15,68$ в системе реализуются хаотические колебания с большой амплитудой. Интервалы существования 3-цикла и 6-цикла, соответствующие областям $\Pi_{3,1}$ и $\Pi_{6,1}$ (см. рис. 2) на рис. 3, а отсутствуют, поскольку бифуркационные диаграммы построены с нулевых начальных условий, что соответствует условиям эксперимента. В то же время карты динамических режимов на рис. 2 построены со случайных начальных условий, что позволяет более четко определять границы областей мультистабильности [13].

Использование метода направления на цель приводит к тому, что на всем интервале вариации коэффициента усиления пропорционального регулятора в системе реализуется 1-цикл (рис. 3, б).

Первая точка бифуркации на рис. 3, в связана с жестким возникновением хаотических колебаний в точке $\alpha_1 = 8,35$. При $\alpha_2 > 8,96$ в сис-

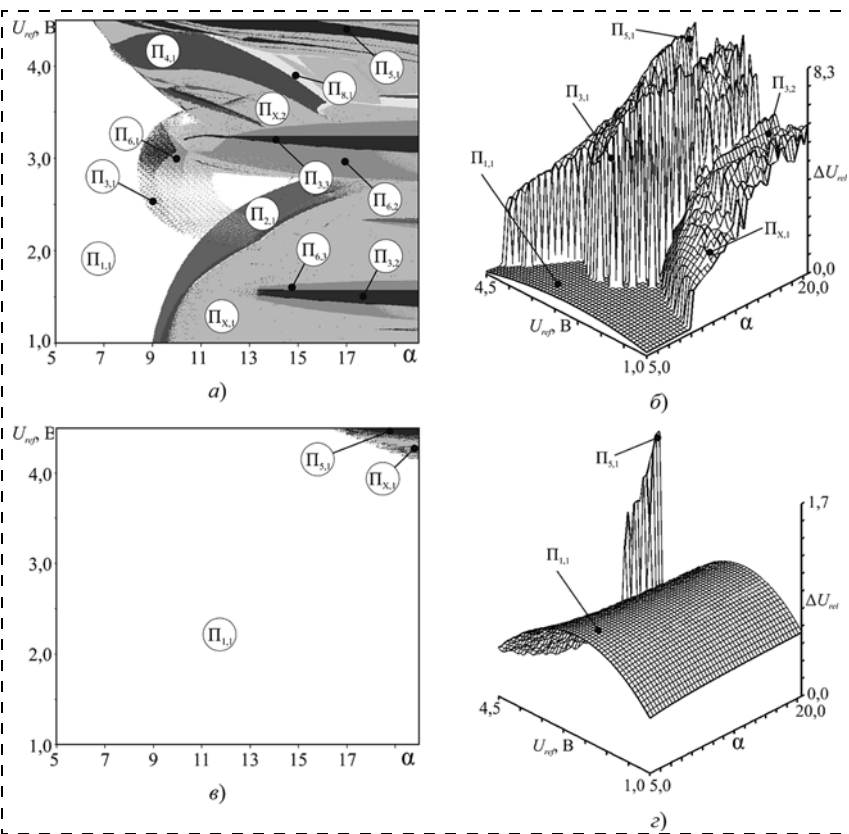


Рис. 2. Карты динамических режимов и диаграммы относительного размаха колебаний САУ с непосредственным понижающим преобразователем:

а, б — без управления нелинейной динамикой; в, г — с управлением нелинейной динамикой на основе метода МНЦ

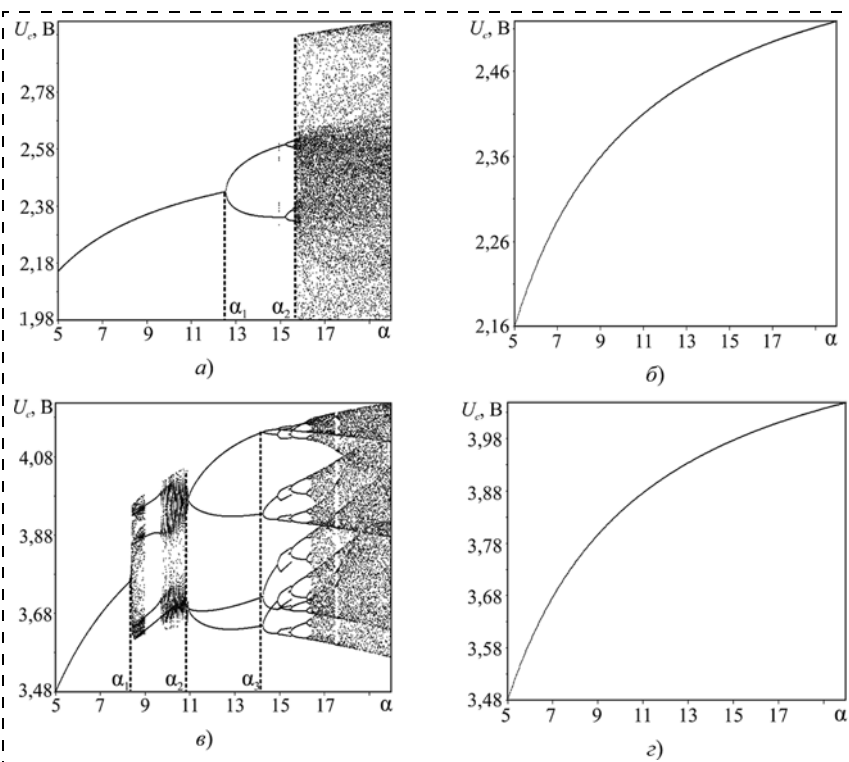


Рис. 3. Бифуркационные диаграммы САУ с непосредственным понижающим преобразователем:

а, в — без управления нелинейной динамикой; б, г — с управлением нелинейной динамикой на основе метода МНЦ

теме возникает 4-цикл. В точке $\alpha_3 = 14,25$ в результате суперкритической бифуркации в системе зарождается 8-цикл. При больших значениях коэффициента усиления α в системе реализуются хаотические колебания. Как видно из рис. 3, 2, использование МНЦ также приводит систему к 1-циклу во всем диапазоне вариации α .

Таким образом, проведенный анализ показал возможность устранения нежелательных динамических режимов с помощью МНЦ. При этом амплитуда переменной составляющей выходного напряжения системы уменьшается в предельном случае в восемь раз по сравнению с системой без использования МНЦ.

Экспериментальные исследования САУ на основе МНЦ

В настоящее время все более широкое распространение приобретают цифровые системы управления импульсными преобразователями, которые позволяют создавать достаточно функциональные системы электропитания. Поэтому основной задачей данного раздела является экспериментальное исследование замкнутой импульсной САУ на основе МНЦ, построенной на базе современного цифрового микроконтроллера.

Функциональная схема низковольтной экспериментальной установки представлена на рис. 4, где приняты следующие обозначения: *СМР* — компараторы; *ADC1*, *ADC2* — аналого-цифровые преобразователи; *DP1*, *DP2* — цифровые потенциометры; *AR1*, *AR2* — активные выпрямители; *KB* — клавиатура; *PS* — силовая часть; *MC* — микроконтроллер.

Как видно из рис. 4, в системе имеются два измерительных канала, каждый из которых отвечает за измерение своей переменной состояния (U_c или I_L). Активный выпрямитель в составе каждого канала необходим для исключения подачи отрицательного напряжения с выхода силовой части. Компараторы обеспечивают передачу информации в микроконтроллер о знаке тока или напряжения на выходе силовой части, что позволяет правильно интерпретировать информацию с выхода активных выпрямителей. Цифровые потенциометры обеспечивают макси-

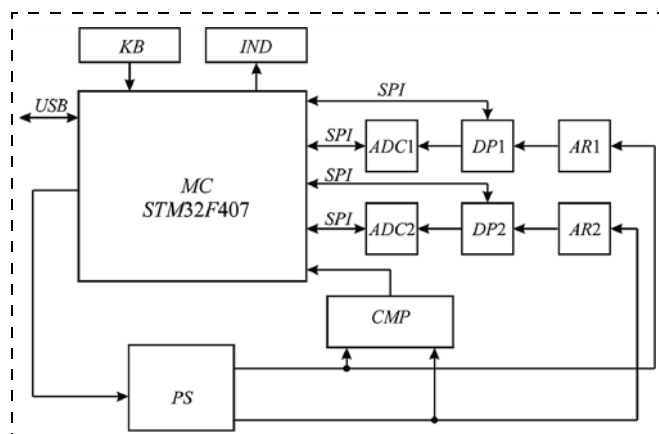


Рис. 4. Функциональная схема экспериментальной установки

мальную ширину динамического диапазона *ADC*. Связь микроконтроллера с *ADC* и *DP* осуществляется по каналу *SPI* (англ. *Serial peripheral interface* — последовательный периферийный интерфейс).

Силовая часть позволяет реализовывать три вида импульсной модуляции: однополярную нереверсивную модуляцию, однополярную реверсивную модуляцию и двухполярную реверсивную модуляцию [13]. Параметры силовой части и цепей обратной связи были представлены выше.

Система управления силовой частью реализована на современном 32-разрядном микроконтроллере *STM32F407* семейства *ARM (Advanced RISC Machine* — усовершенствованная *RISC*-машина). Связь с персональным компьютером для передачи информации при построении бифуркационных диаграмм осуществляется по каналу *USB* (англ. *Universal Serial Bus* — универсальная последовательная шина).

Как известно, особенностью МНЦ является необходимость вычисления требуемой неподвижной точки 1-цикла при известных параметрах системы [11]. Для этого применяются достаточно сложные алгоритмы типа метода неподвижной точки [15] или метода уравнений периодов [13]. В рассматриваемой экспериментальной установке информация о неподвижной точке отображения при определенном наборе параметров хранится в энергонезависимой памяти контроллера в табличной форме. При этом указанная таблица рассчитывается предварительно на компьютере с использованием метода уравнений периодов. Вычисление требуемой неподвижной точки отображения осуществлялось с применением линейной интерполяции.

Предлагаемая экспериментальная установка позволяет проводить весь комплекс экспериментов, необходимых при бифуркационном подходе к проектированию замкнутых импульсных САУ.

При использовании экспериментальной установки параметры аналоговых блоков на рис. 1 (амплитуда пилообразного напряжения, сигнал задания, компоненты вектора задания на неподвижную точку отображения x_{1k3} и x_{2k3}) переводились в эквивалентные цифровые коды в целях сохранения идентичности цифровой и аналоговой систем управления.

На рис. 5 представлены экспериментальные бифуркационные диаграммы, построенные при параметрах, выбранных для построения диаграмм на рис. 3.

Сравнительный анализ рис. 3 и рис. 5 показывает высокую степень сходства. На рис. 5, *а* точки бифуркации: $\alpha_1 = 12,35$; $\alpha_2 = 15,2$. На рис. 5, *б* точки бифуркации: $\alpha_1 = 8,6$; $\alpha_2 = 10,7$; $\alpha_3 = 14,5$. Очевидно, что точки бифуркации, полученные экспериментально, близки по численным значениям к точкам бифуркаций, рассчитанным с использованием кусочно-гладкой модели. Кроме того, из рис. 5 можно сделать вывод о работоспособности цифровой системы управления непосредственным понижающим преобразователем на основе МНЦ, поскольку

во всем диапазоне вариации α в системе присутствует 1-цикл.

Также стоит обратить внимание на отличия теоретических и экспериментальных данных, связанных с неточностью математической модели. Так, на рис. 3, в на интервале $[\alpha_1; \alpha_2]$ имеется интервал существования 4-цикла. В то же время на рис. 5, в на указанном интервале присутствуют хаотические колебания.

Некоторое отличие экспериментальных данных можно отметить и при анализе бифуркационных диаграмм, построенных при использовании СУ на основе МНЦ. Так, на рис. 3, б при $\alpha = 20$ $U_c = 2,51$ В, а на рис. 5, б $U_c = 2,49$ В. Аналогичный анализ можно провести и для бифуркационных диаграмм, построенных при $U_{ref} = 3,96$ В. Как следует из рис. 3, г, при $\alpha = 20$ $U_c = 4,03$ В, а на рис. 5, г в аналогичном случае $U_c = 3,96$ В. Значение отклонений является приемлемым с точки зрения практики.

Заключение

В работе выполнено экспериментальное исследование системы управления непосредственным понижающим преобразователем напряжения на основе МНЦ. Представленные результаты получены впервые и подтверждают работоспособность системы управления, предложенной в работе [11]. Предлагаемая система управления не требует высокой производительности управляющего микроконтроллера, что расширяет спектр ее применения для широкого класса преобразователей. Стоит отметить, что примененный для исследования микроконтроллер обладает избыточной для данного метода производительностью, и его выбор объясняется более широким предназначением экспериментальной установки. Несмотря на то что в работе рассматривался преобразователь постоянного напряжения первого рода, очевидно, что предлагаемая система управления может быть применена и в случае преобразователей второго и третьего родов, поскольку они описываются функциями стробоскопического отображения, аналогичными функции для преобразователя первого рода.

Список литературы

1. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005. 632 с.
2. Баушев В. С., Жусубалиев Ж. Т. О недетерминированных режимах функционирования стабилизатора напряжения с широтно-импульсным регулированием // Электричество. 1992. № 8. С. 47–53.
3. Жусубалиев Ж. Т., Колоколов Ю. В. Бифуркации и хаос в релейных и широтно-импульсных системах автоматического управления. М.: Машиностроение-1, 2001. 120 с.

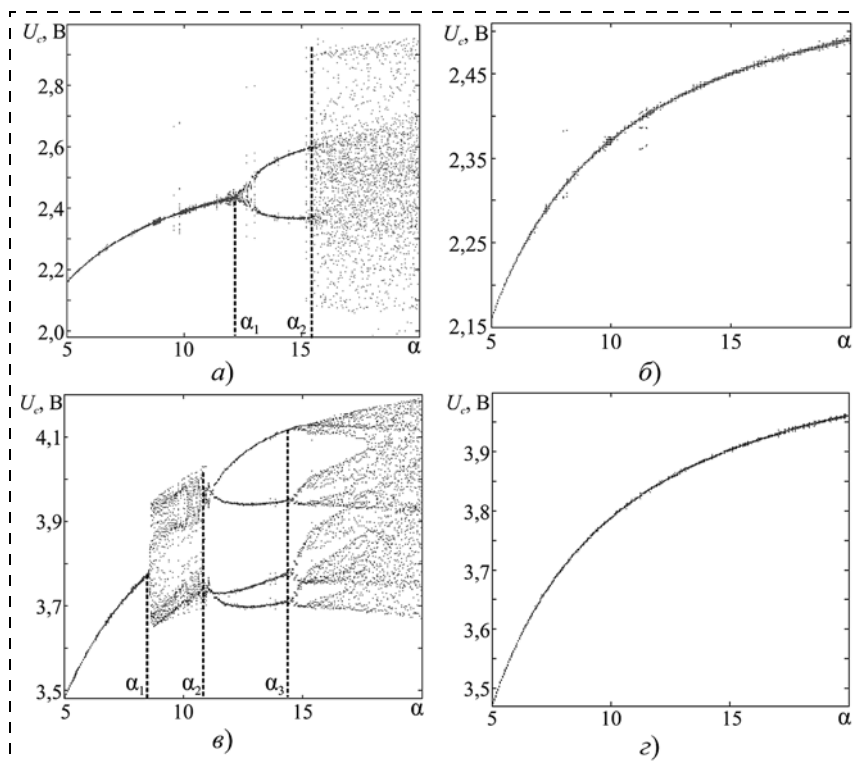


Рис. 5. Экспериментальные бифуркационные диаграммы САУ с непосредственным понижающим преобразователем:

а, в — без управления нелинейной динамикой; б, г — с управлением нелинейной динамикой на основе метода МНЦ

4. Ott E, Grebogi C., Yorke G. Controlling Chaos // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64, N. 11. P. 1796–1199.
5. Dragan F. Controlling a chaotic behavior of a Current Mode Controlled Boost Converter Using Ott-Grebog-Yorke Method // IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing. 2006. Vol. 1. P. 156–172.
6. Poddar G., Chakrabarty K., Banerjee S. Control of chaos in DC-DC converter // Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1998. Vol. 45, N. 6. P. 672–676.
7. Poddar G., Chakrabarty K., Banerjee S. Experimental Control of Chaotic Behavior of Buck Converter // Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. 1995. Vol. 42, N. 8. P. 502–504.
8. Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback // Phys. Rev. Lett. A. 1992. Vol. 170, N. 6. P. 421–428.
9. Batlle C., Fossas E., Olivar G. Stabilization of periodic orbits of the buck converter by time-delayed feedback // International Journal of Circuit Theory and Applications. 1999. Vol. 27, N. 3. P. 617–631.
10. Dattani J., Blake J. C.H., Hilker F. M. Target-oriented chaos control // Phys. Lett. A. 2011. Vol. 375, Iss. 45. P. 3986–3992.
11. Андриянов А. И., Краснов Н. А. Нейросетевая система управления нелинейной динамикой непосредственного понижающего преобразователя напряжения // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 12. С. 33–38.
12. Северис Р., Блум Г. Импульсные преобразователи постоянного напряжения для систем вторичного электропитания. М.: Энергоатомиздат, 1988. 294 с.
13. Кобзев А. В., Михальченко Г. Я., Андриянов А. И., Михальченко С. Г. Нелинейная динамика полупроводниковых преобразователей. Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2007. 224 с.
14. Анищенко В. С., Вадивасова Т. Е., Астахов В. В. Нелинейная динамика хаотических и стохастических систем: фундаментальные основы и избранные проблемы. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. 368 с.
15. Андриянов А. И., Булохов Н. М. Алгоритмы для бифуркационного анализа обобщенной модели преобразователей постоянного напряжения // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 10. С. 30–39.
16. Андриянов А. И., Малаханов А. А. Математическое моделирование динамики импульсного преобразователя напряжения повышающего типа // Вестник Брянского государственного технического университета. 2006. № 1 (9). С. 61–69.

Experimental Study of Nonlinear Dynamics of Switching Power Converters Based on Target-Oriented Control

A. I. Andriyanov, mail@ahaos.ru✉, D. Yu. Mikhaltsov, blackhero2006@yandex.ru,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241032, Russian Federation

Corresponding author: Andriyanov Aleksey I., Ph. D., Associate Professor,
Bryansk State Technical University, Bryansk, 241032, Russian Federation,
e-mail: mail@ahaos.ru

Received on March 23, 2016

Accepted on April 04, 2016

The main purpose of the research is experimental study of nonlinear dynamics of a buck converter with the control system based on target-oriented control which allows eliminating undesirable dynamic modes. Target-oriented control is a relatively new nonlinear dynamics control method and until now the possibility of its application for nonlinear dynamics control of switching power converters has been given only a theoretical estimation. In order to accomplish the mentioned purpose, the study of nonlinear dynamics behavior of the considered system using a mathematical simulation is required. Thereafter, the results of the study should be experimentally verified. The systems of the considered class are described by piecewise-smooth mathematical models in terms of differential equations with discontinuous right-hand side. This paper presents a mathematical model of the automatic control system based on target-oriented control in its stroboscopic maps. The transition to stroboscopic maps is implemented by solving a primal system of differential equations. Dynamic modes maps and voltage ripple relative swing amplitude diagrams have been calculated using the given mathematical model. They allow estimating a certain dynamic mode damages in relation to the output voltage parasitic oscillation amplitude. This paper also presents a functional description of the experimental circuit for study of nonlinear dynamics behavior of a closed-loop control system with different pulse-width modulation types. The peculiarity of the experimental circuit is the control system based on high-performance ARM core microcontroller, allowing the method feasibility estimation and using up-to-date hardware components. One-parameter bifurcation diagrams were calculated using both the mathematical model and the experimental circuit. A comparative study of the theoretical and experimental bifurcation diagrams has been carried out. The efficiency of nonlinear dynamics of target-oriented control for a buck converter has been proved. The given results have been quoted for the first time. They can be used for development the automatic control systems for a broad range of switching power converters types.

Keywords: electric power supply, transistor power converter, nonlinear dynamics, bifurcation, target-oriented control, pulse-width modulation

Acknowledgements: This work was supported by RFBR (grant № 14-08-31126)

For citation:

Andriyanov A. I., Mikhaltsov D. Yu. Experimental Study of Nonlinear Dynamics of Switching Power Converters Based on Target-Oriented Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 690–696.

DOI: 10.17587/mau.17.690-696

References

1. Meleshin V. I. *Tranzistornaya preobrazovatel'naya tekhnika* (Transistor converting technique), Moscow, Tehnosfera, 2005, 632 p. (in Russian).
2. Baushev V. S., Zhusubaliyev Zh. T. *O nedeterminirovannykh rezhimakh funkcionirovaniya stabilizatora napryazheniya s shirotno-impul'snym regulirovaniem* (About the nondeterministic modes of a voltage stabilizer with pulse-width regulation), *Elektrichestvo*, 1992, no. 8, pp. 47–53 (in Russian).
3. Zhusubaliyev Zh. T., Kolokolov Yu. V. *Bifurkatsii i haos v releykh i shirotno-impul'snykh sistemakh avtomaticheskogo upravleniya* (Bifurcations and chaos in relay and pulse-width automatic control systems), Moscow, Mashinostroenie-1, 2001, 120 p.
4. Ott E., Grebogi C., Yorke G. Controlling Chaos, *Phys. Rev. Lett.*, 1990, vol. 64, no. 11, pp. 1796–1199.
5. Dragan F. Controlling a chaotic behavior of a Current Mode Controlled Boost Converter Using Ott-Grebogy-Yorke Method, *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing*, 2006, vol. 1, pp. 156–172.
6. Poddar G., Chakrabarty K., Banerjee S. Control of chaos in DC-DC converter, *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1998, vol. 45, no. 6, pp. 672–676.
7. Poddar G., Chakrabarty K., Banerjee S. Experimental Control of Chaotic Behavior of Buck Converter, *Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1995, vol. 42, no. 8, pp. 502–504.
8. Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback, *Phys. Rev. Lett. A*, 1992, vol. 170, no. 6, pp. 421–428.
9. Batlle C., Fossas E., Olivar G. Stabilization of periodic orbits of the buck converter by time-delayed feedback, *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 1999, vol. 27, no. 3, pp. 617–631.
10. Dattani J., Blake J. C.H., Hilker F. M. Target-oriented chaos control, *Phys. Lett. A*, 2011, vol. 375, iss. 45, pp. 3986–3992.
11. Andriyanov A. I., Krasnov N. I. Neural network control system of nonlinear dynamic of buck-converter, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2013, vol. 56, no. 12, pp. 33–38.
12. Severns R., Bloom G. *Impul'snye preobrazovateli postojannogo napryazheniya dlya sistem vtorichnogo jelektropitanija* (Switching converters of constant voltage for systems of secondary power supply), Moscow, Jenergoatomizdat, 1988, 294 p. (in Russian).
13. Kobzev A. V., Mihal'chenko G. Ya., Andriyanov A. I., Mihal'chenko S. G. *Nelinejnaya dinamika poluprovodnikovyykh preobrazovatelej* (Nonlinear dynamics of semiconductor converters), Tomsk, Tomskij gosudarstvennyj universitet sistem upravleniya i radioelektroniki, 2007, 224 p. (in Russian).
14. Anishhenko V. S., Vadivasova T. E., Astahov V. V. *Nelinejnaya dinamika haoticheskikh i stohasticheskikh sistem: Fundamental'-nye osnovy i izbrannye problemy* (Nonlinear dynamics of chaotic and stochastic systems: Fundamental bases and chosen problems), Saratov, Izdatel'stvo Saratovskogo universiteta, 1999, 368 p. (in Russian).
15. Andriyanov A. I., Bulokhov N. M. *Algoritmy dlya bifurkatsionnogo analiza obobshhennoj modeli preobrazovatelej postojannogo napryazheniya* (Algorithms for the bifurcation analysis of the generalized model of pulse-width converters), *Spravochnik. Inzhenerny Zhurnal*, 2013, no. 10, pp. 30–39 (in Russian).
16. Andriyanov A. I., Malakhanov A. A. *Matematicheskoe modelirovanie dinamiki impul'snogo preobrazovatelja napryazheniya povyshtushhego tipa* (Mathematical modeling of dynamics of the boost converter), *Vestnik Brjanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, no. 1, pp. 61–69 (in Russian).

В. В. Маркелов¹, ведущий инженер-программист, **А. В. Шукалов**², канд. техн. наук, доц.,
М. О. Костишин², канд. техн. наук, доц., maksim@kostishin.com,
И. О. Жаринов², д-р техн. наук, доц., зав. кафедрой, igor_rabota@pisem.net,
В. А. Нечаев^{1, 2}, главный конструктор, старший преподаватель,
¹ АО "ОКБ "Электроавтоматика",
² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО)

Алгоритм расчета навигационных параметров полета летательного аппарата по маршрутам зональной навигации

Рассматривается проблема повышения ситуационной осведомленности экипажа воздушного судна. Предлагается алгоритм расчета и формирования навигационных параметров полета в горизонтальной плоскости по маршрутам зональной навигации, используемый в качестве функционального дополнения программно-математического обеспечения бортового комплекса [1–3]. Расчет навигационных параметров полета осуществляется в реальном времени на основе данных о текущем и следующем участках траекторий, составляющих маршрут, с учетом фактических параметров полета. Рассматривается набор участков траекторий, применяемых для построения схем и маршрутов зональной навигации. Рассчитанные параметры используются для отображения на многофункциональных индикаторах кабины экипажа, а также, при необходимости, для формирования директорных и управляющих сигналов. Алгоритм расчета позволяет осуществить адаптацию бортового пилотажно-навигационного комплекса под требования, предъявляемые к системам зональной навигации, в части обеспечения экипажа необходимыми навигационными параметрами полета в горизонтальной плоскости.

Ключевые слова: навигационные параметры полета, навигационный алгоритм, зональная навигация

Введение

Маршруты зональной навигации позволяют обеспечить вылет, прибытие и заход на посадку с выдерживанием установленного запаса высоты над препятствиями при оптимальных градиентах набора высоты и снижения, пролет и облет потенциально опасных или закрытых для полетов районов, районов снижения шума, а также упорядочить движение воздушных судов в целях предотвращения опасных сближений между ними при увеличении пропускной способности аэродрома и повышения качества управления воздушным движением.

В большинстве современных воздушных судов функции полета по маршрутам (схемам) зональной навигации обеспечиваются в полном объеме системами самолетовождения. Однако имеется целый ряд воздушных судов, не обладающих данными функциями. Отсутствие функций обуславливалось имеющим место в прошлом единичным использованием схем зональной навигации на отечественных аэродромах.

В настоящее время при расширении внедрения схем зональной навигации, применяемых в районе аэроузла, а также при повышении требований к выполнению данных схем как в зарубежных, так и в отечественном воздушном пространстве, возникла потребность в обеспечении полетов по данным схемам воздушных судов, не обладающих необходимой функциональностью.

Решение данной проблемы обычно осуществляется либо с помощью использования дополнительных автономных инструментов — мобильных навигационных систем, либо с использованием электронных карт-схем зональной навигации.

Основными недостатками данных подходов является отсутствие согласованности показаний основных датчиков пилотажно-навигационной информации с выполняемой схемой полета и появление дополнительной нагрузки на экипаж.

Устранить данные недостатки представляется возможным путем дополнительной доработки программно-математического обеспечения бортового комплекса.

Для осуществления полетов по схемам и маршрутам зональной навигации бортовое навигационное оборудование воздушного судна должно обеспечивать решение задачи выдерживания заданной траектории движения в горизонтальной плоскости. Результатом решения данной задачи является набор основных параметров, включающий в себя заданный путевой угол, заданный курс, боковое отклонение от линии пути, расстояние по траектории и оставшееся время.

Отображение указанных навигационных параметров на многофункциональных индикаторах обеспечивает информирование экипажа об отклонении от заданной траектории и наведение летательного аппарата по каналу курса для выдержива-

Траектории зональной навигации

Указатель окончания траектории и описание траектории		Исходные данные
CA	Полет с заданным путевым углом до достижения заданной высоты	ЗПУ — заданный путевой угол $H_{\text{набор}}/H_{\text{снижение}}$ — заданная высота
CF	Полет в заданную контрольную точку с заданным путевым углом подхода	НТ — координаты контрольной точки ЗПУ — заданный путевой угол Признак пролета
DF	Полет прямо на заданную контрольную точку	НТ — координаты контрольной точки Признак пролета
FA	Полет от заданной контрольной точки с заданным путевым углом до достижения заданной высоты	НТ — координаты контрольной точки ЗПУ — заданный путевой угол $H_{\text{набор}}/H_{\text{снижение}}$ — заданная высота
FM	Полет от заданной контрольной точки с заданным путевым углом с окончанием траектории вручную	НТ — координаты контрольной точки ЗПУ — заданный путевой угол
NM	Полет в зоне ожидания относительно заданной контрольной точки с окончанием траектории вручную	НТ — координаты точки зоны ожидания ЗПУ — заданный путевой угол приближения L — длина участка приближения TD — направление разворота (+1 — правый)
RF	Полет по дуге заданного радиуса вокруг заданного центра до заданной контрольной точки	ЦД — координаты центра дуги RA — радиус дуги TD — направление разворота (+1 — правый) НТ — координаты контрольной точки на дуге $ПУ_{\text{нт}}$ — направление линии пути удаления Признак пролета
TF	Полет по линии пути между двумя заданными контрольными точками	НТ0 — координаты первой контрольной точки НТ — координаты второй контрольной точки (ЗПУ — направление линии пути к НТ) Признак пролета
VA	Полет с заданным курсом до достижения заданной высоты	$\Psi_{\text{зад}}$ — заданный курс $H_{\text{набор}}/H_{\text{снижение}}$ — заданная высота
VI	Полет с заданным курсом до пересечения с заданной линией пути	$\Psi_{\text{зад}}$ — заданный курс Признак пролета
VM	Полет с заданным курсом с окончанием траектории вручную	$\Psi_{\text{зад}}$ — заданный курс

ния траектории [4, 5]. При необходимости данные параметры также используются для формирования директорных и управляющих сигналов.

1. Принцип отображения навигационных параметров на многофункциональных индикаторах

Примеры индикационных кадров, содержащих навигационные параметры, на экране многофункционального индикатора приведены на рис. 1 (см. вторую сторону обложки).

Схемы и маршруты полета зональной навигации представляются на экране в виде заданной последовательности участков траекторий, характеризующихся описанием требований полета по участку и признаками его окончания. Участки траекторий, используемые в схемах зональной навигации, регламентируются правилами аэронавигационного обслуживания ИКАО DOC 8168 "Производство полетов воздушных судов" и кодируются в виде указателей окончания траекторий. Указатели окончания траекторий и набор данных, необходимых для обеспечения полета по участкам траекторий, опре-

делены стандартом ARINC-424-15 "Технические требования к базе данных навигационных систем".

Перечень и описание указателей окончания траекторий, приемлемых для построения схем с применением принципов зональной навигации, представлены в таблице. Данные таблицы являются исходными данными для разработки алгоритма зональной навигации [6, 7].

2. Алгоритм расчета навигационных параметров полета летательного аппарата по маршрутам зональной навигации

Расчет навигационных параметров полета на основе данных о текущем и следующем участках траектории с учетом фактических параметров полета реализуется с помощью специализированного алгоритма, представленного на рис. 2.

Алгоритм является составной частью программного обеспечения авиационного комплекса и встраивается в основной вычислительный контур бортовой вычислительной системы в качестве самостоятельного модуля. Алгоритм основан на применении оператора выбора и выполняется в теле

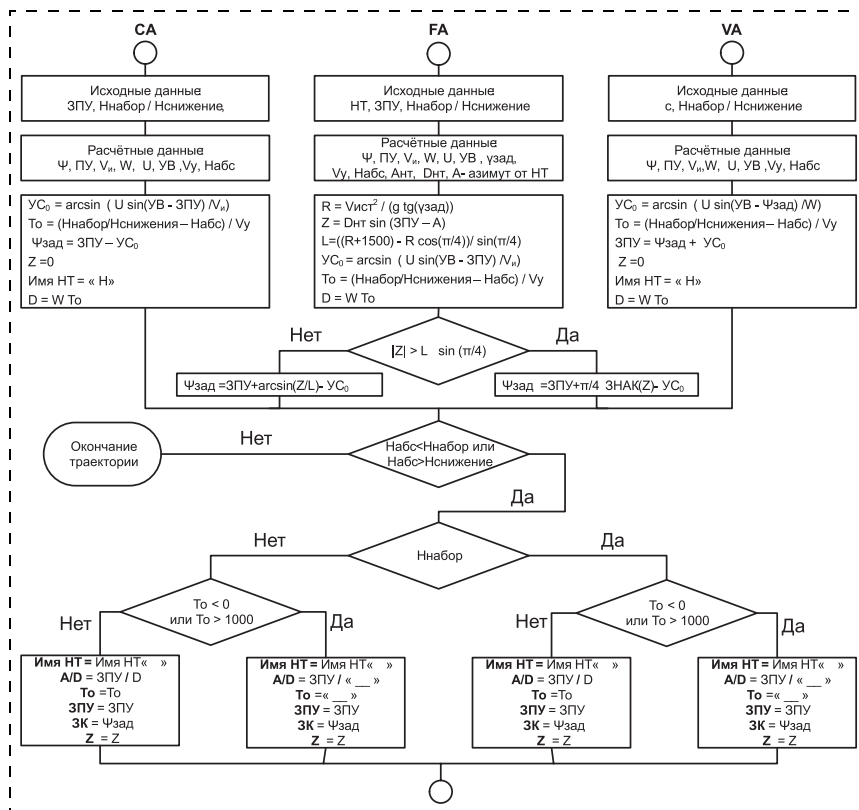


Рис. 5. Алгоритм расчета участков траекторий CA, FA, VA

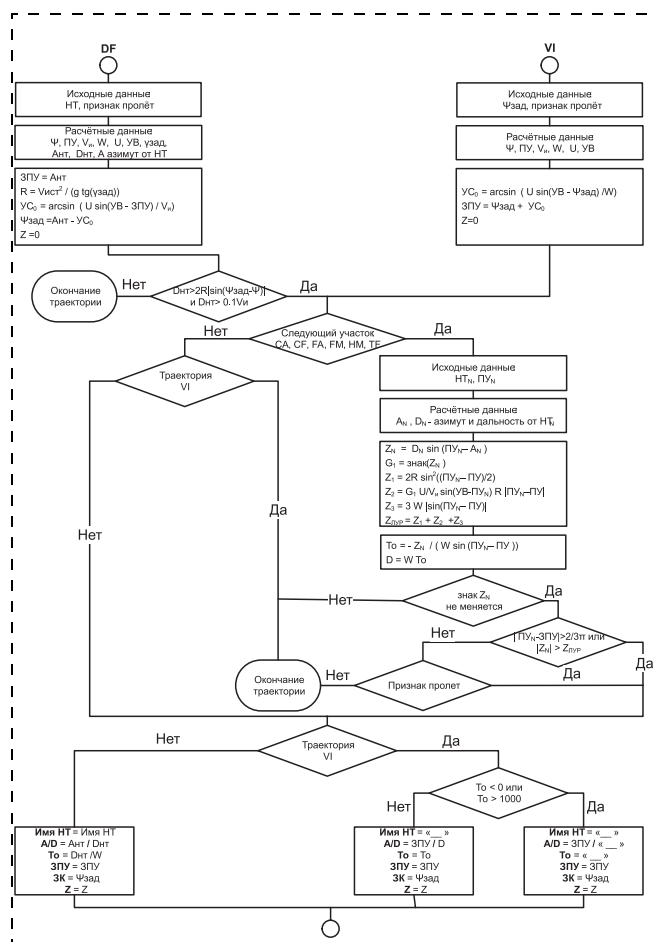


Рис. 6. Алгоритм расчета участков траекторий DF, VI

- RA_N — радиус дуги участка RF;
 - TD_N — направление разворота по дуге для участка RF.
- В алгоритме используются текущие расчетные данные, определенные или вычисленные бортовым пилотажно-навигационным комплексом:
- Ψ — текущий курс (истинный или магнитный);
 - ПУ — текущий путевой угол (истинный или магнитный);
 - $V_{\text{и}}$ — текущая истинная скорость (м/с);
 - W — текущая путевая скорость (м/с);
 - U — скорость ветра (м/с);
 - UB — навигационное направление ветра (радианы);
 - $\gamma_{\text{зад}}$ — заданный угол крена для разворота (радианы);
 - $A_{\text{нт}}$ — азимут на заданную контрольную точку НТ (радианы);
 - $D_{\text{нт}}$ — дальность до заданной контрольной точки НТ (м);
 - A — азимут от заданной контрольной точки НТ (радианы);
 - $A_{\text{цд}}$ — азимут на центр дуги (радианы);

- $D_{\text{цд}}$ — дальность до центра дуги (м);
- V_y — вертикальная скорость (м/с);
- $H_{\text{абс}}$ — абсолютная высота (м).

На входе обобщенного алгоритма реализуется диспетчер, определяющий в зависимости от указателя окончания исполняемой траектории (CF, TF, RF, HM, FM, VM, CA, FA, VA, DF, VI) необходимую вычислительную ветвь — исполняемый далее алгоритм вычисления навигационных параметров полета по участкам траекторий.

Алгоритмы вычисления навигационных параметров полета по участкам траекторий CF, TF и RF (рис. 3) включают в себя определение положения воздушного судна относительно заданной линии пути. В качестве заданной линии пути принимается: для участка CF — линия пути, проходящая через заданную навигационную точку с заданным путевым углом; для участка TF — линия пути, проходящая через две заданные навигационные точки с расчетным путевым углом; для участка RF — линия пути, совпадающая с ближайшей касательной к заданной дуге [8, 9].

Заданный курс рассчитывается как направление на точку на заданной линии пути, расположенной на фиксированном удалении от воздушного судна с ограничением угла приближения значением 45° . Окончание участка определяется наличием признака пролета и параметрами следующего участка траектории. При отсутствии признака пролета и наличии фиксированной линии пути на следующем участке текущий участок траектории оканчивается на расчетном упреждении, определяющемся крат-

чайшим выходом на линию пути следующего участка с ограничением угла разворота значением 120° . Иначе текущий участок траектории оканчивается при обнулении расстояния по линии пути до заданной навигационной точки.

Алгоритмы вычисления навигационных параметров полета по участкам траектории FA и FM (рис. 4, 5) включают в себя определение положения воздушного судна относительно заданной линии пути, проходящей через заданную навигационную точку с заданным путевым углом. Заданный курс рассчитывается как направление на точку на заданной линии пути, расположенной на фиксированном удалении от воздушного судна с ограничением угла приближения значением 45° . Окончание участка FA определяется пролетом характерной точки траектории, в которой достигается заданная высота. Участок FM оканчивается при принудительной отмене экипажем.

Алгоритмы вычисления навигационных параметров полета по участкам траектории CA, VA, VM и VI (рис. 4—6) определяют условия окончания полета в заданном направлении. Заданный путевой угол для траектории CA или курс для траекторий VA, VM и VI задаются в исходных данных. Окончание участков CA и VA определяется пролетом характерной точки траектории, в которой достигается заданная высота. Участок VM оканчивается при принудительной отмене экипажем. Окончание участка VI определяется наличием признака пролета и параметрами следующего участка траектории, который обязательно должен иметь фиксированную линию пути. При отсутствии признака пролета текущий участок траектории оканчивается на расчетном упреждении, обеспечивающем кратчайший выход на линию пути следующего участка с ограничением угла разворота значением 120° . Иначе текущий участок траектории оканчивается при пересечении линии пути следующего участка.

Алгоритм вычисления навигационных параметров полета по участку траектории DF (рис. 6) включает в себя определение заданного путевого угла как направления на заданную навигационную точку. Окончание участка определяется наличием признака пролета и параметрами следующего участка траектории. При отсутствии признака пролета и наличии фиксированной линии пути на следующем участке текущий участок траектории оканчивается на расчетном упреждении, обеспечивающем кратчайший выход на линию пути следующего участка с ограничением угла разворота значением 120° . Иначе текущий участок траектории оканчивается при минимальном приближении к заданной навигационной точке.

Алгоритм вычисления навигационных параметров полета по участку траектории НМ (см. рис. 4) включает в себя определение положения воздушного судна относительно заданной линии пути, проходящей через заданную навигационную точку с заданным путевым углом и представляющей со-

бой линию приближения. При обнулении расстояния по линии пути до заданной навигационной точки осуществляется переход на линию удаления, обратную и параллельную линии пути приближения и расположенную в заданном направлении на дальности, равной двум радиусам разворота с учетом влияния ветра. Полет по линии пути удаления продолжается до заданного удаления от траверза навигационной точки. После этого вновь осуществляется переход на линию приближения. Заданный курс рассчитывается аналогично полету по участкам траектории CF. Полет по участку НМ продолжается до очередного пролета заданной навигационной точки после принудительной отмены экипажем [10, 11].

Заключение

Приведенные на рис. 2—6 блок-схемы алгоритма расчета и формирования навигационных параметров полета позволяют обеспечить отображение на бортовых многофункциональных индикаторах параметров в объеме, необходимом экипажу для выполнения полетов по маршрутам зональной навигации в горизонтальной плоскости. Вместе с тем, использование данных параметров позволяет реализовать как директорный, так и автоматический режим выполнения полета по заданному маршруту.

Реализация алгоритма в бортовой вычислительной системе адаптирует бортовой пилотажно-навигационный комплекс под требования, предъявляемые к системам зональной навигации в части обеспечения экипажа необходимой информацией для полетов в горизонтальной плоскости.

Список литературы

1. Парамонов П. П., Коновалов П. В., Жаринов И. О., Кирсанова Ю. А., Уткин С. Б. Реализация структуры данных, используемых при формировании индикационного кадра в бортовых системах картографической информации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 2. С. 165—167.
2. Жаринов И. О., Жаринов О. О. Бортовые средства отображения информации на плоских жидкокристаллических панелях: Учеб. пособие // Информационно-управляющие системы. СПб.: ГУАП, 2005. 144 с.
3. Костишин М. О., Жаринов И. О., Жаринов О. О., Нечаев В. А., Суслов В. Д. Оценка точности визуализации местоположения объекта в геоинформационных системах и системах индикации навигационных комплексов пилотируемых летательных аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 87—93.
4. Парамонов П. П., Ильченко Ю. А., Жаринов И. О., Тарасов П. Ю. Структурный анализ и синтез графических изображений на экранах современных средств бортовой индикации на плоских жидкокристаллических панелях // Авиакосмическое приборостроение. 2004. № 5. С. 50—57.
5. Парамонов П. П., Костишин М. О., Жаринов И. О., Нечаев В. А., Сударчиков С. А. Принцип формирования и отображения массива геоинформационных данных на экран средств бортовой индикации // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 136—142.
6. Navigation System Data Base. ARINC Specification 424.
7. Guidance Material for Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV).

8. Харин Е. Г. Комплексная обработка информации навигационных систем летательных аппаратов. Опыт многолетнего практического применения. М.: Изд-во МАИ, 2002. 264 с.

9. Липин А. В., Ключников Ю. И. Применение зональной навигации при обслуживании воздушного движения. Зональная навигация. Университет ГА. С.-Петербург, 2011. 79 с.

10. Харин Е. Г., Копылов И. А. Технологии летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с приме-

нением комплекса бортовых траекторных измерений. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2012. 360 с.

11. Харин Е. Г., Копылов И. А., Копелович В. А., Ясенюк А. В. Технология автоматизированного оценивания самолетовождения по стандартным маршрутам вылета и прибытия // Сб. трудов XXII междунар. конф. по интегрированным навигационным системам, СПб.: Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2015. С. 157–161.

Algorithm for Calculation of the Aircraft Navigational Flight Parameters on RNAV Routes

V. V. Markelov¹, A. V. Shukalov², M. O. Kostishin², maksim@kostishin.com,

I. O. Zharinov², igor_rabota@pisem.net✉, V. A. Nechayev^{1, 2},

¹Stock company "Experimental Design Bureau "Electroavtomatika" named after P. A. Yefimov, St. Petersburg, 198095, Russian Federation,

²National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (University ITMO), St. Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: Zharinov Igor O., D. Sc., Chief of Department, Associate Professor, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (University ITMO), St. Petersburg, 198095, Russian Federation, e-mail: igor_rabota@pisem.net

Received on June 27, 2016

Accepted on July 04, 2016

During the flights on RNAV routes the aircraft equipped with the flight and navigation systems not adapted for implementation of the area navigation functions, a problem arises of lack of the adequate information support for the crew. The situational awareness of the crew is improved with Dora-processing on-board equipment providing the crew with the required volume of the navigation parameters. An algorithm is offered for calculation and formation of the navigational flight parameters in the horizontal plane along the RNAV routes, which can be used as augmentation program for the onboard software complex. Calculation of the flight navigation parameters is performed in real time based on the data about the current and next phases of the route trajectory based on the actual flight data. We consider a set of the trajectories of the sites applied to build the circuits and route area navigation. The trajectory data settings are contained in the air navigation databases, compiled in accordance with the aviation industry standards. The calculation algorithm allows us to obtain the navigational flight parameters and display them in the same format, as in the next one, and change the operational sequence of the route segments. The calculated parameters can be displayed on the cockpit multifunction displays and, if necessary, generate the control signals and Yagi. The calculation algorithm allows adaptation of the onboard navigation system to the requirements of the area navigation systems.

Keywords: navigation flight parameters, navigation algorithm, area navigation

For citation:

Markelov V. V., Shukalov A. V., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechayev V. A. Algorithm for Calculation of the Aircraft Navigational Flight Parameters on RNAV Routes, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 697–702.

DOI: 10.17587/mau.17.697-702

References

1. Paramonov P. P., Konovalov P. V., Zharinov I. O., Kirsanova Ju. A., Utkin S. B. Implementation of data structure in indication frame formation for onboard geospatial data computer systems (Implementation of the data structures used in the formation of the indicator frame in airborne systems cartographic information), *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 2, pp. 165–167 (In Russian).

2. Zharinov I. O., Zharinov O. O. Onboard display on flat liquid crystal panels (Airborne displaying information on a flat panel liquid crystal), *Informacionno-upravljajushhie sistemy*, SPb, GUAP, 2005, p. 144 c.

3. Kostishin M. O., Zharinov I. O., Zharinov O. O., Nechayev V. A., Suslov V. D. Accuracy evaluation of the object location visualization for geo-information and display systems of manned aircraft navigation complexes (Evaluation of imaging positioning accuracy Geoinformation systems and navigation systems display systems Timber-orientable-aircrafts), *Nauchno-Tekhnicheskii Vestnik Informatsionnykh Tekhnologii, Mekhaniki i Optiki*, 2014, no. 1, pp. 87–93 (in Russian).

4. Paramonov P. P., Il'chenko Yu. A., Zharinov I. O., Tarasov P. Yu. Structural analysis and synthesis of graphic images on the screens of modern on-board display on flat liquid crystal panels (Structural

analysis and synthesis of graphic images on the screens of modern on-board display at LCD Flat Panel), *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2004, no. 5, pp. 50–57 (In Russian).

5. Paramonov P. P., Kostishin M. O., Zharinov I. O., Nechaev V. A., Sudarchikov S. A. Formation and display principles for an array of geoinformation data by means of onboard display screen (The principle of forming and displaying an array of geospatial data on the screen means display board), *Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 6, pp. 136–142 (in Russian).

6. Navigation System Data Base, ARINC Specification 424.

7. Guidance Material for Design of Terminal Procedures for Area Navigation (DME/DME, B-GNSS, Baro-VNAV & RNP-RNAV).

8. Kharin E. G. Kompleksnaya obrabotka informatsii navigatsionnykh sistem letatel'nykh apparatov (Complex Information Processing of Aircraft Navigation Systems), Moscow, Publishing house of MAI, 2002, 264 p. (in Russian).

9. Lipin A. V., Klyuchnikov Yu. I. Primenenie zonal'noy navigatsii pri obsluzhivanii vozdušnogo dvizheniya. Zonal'naya navigatsiya (Use of Area Navigation in Air traffic service. Area Navigation), University CA, Saint- Petersburg Publ., 2011, 79 p. (in Russian).

10. Kharin E. G., Kopylov I. A. Tekhnologii letnykh ispytaniy bortovogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov s primeneniem kompleksa bortovykh traektornykh izmereniy (The Onboard Trajectory Measurements Complex), Moscow, MAI-PRINT, 2012, 360 p. (in Russian).

11. Kharin E. G., Kopylov I. A., Kopylov V. A., Yasenok A. V. Tekhnologiya avtomatizirovannogo otsenivaniya samoletovozhdeniya po standartnym marshrutam vyleta i pribytiya (Automatic Evaluation of Aircraft Navigation along Standard Instrument Departure and Arrival Routes), *Proceedings of 22-th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg, Elektropribor, Russia, 2015, pp. 176–180 (in Russian).

А. В. Колисниченко, инженер, АО Камов, **Б. Е. Федун**, д-р техн. наук, проф., boris_fed@gosniias.ru
ФГУП ГосНИИАС

Бортовая интеллектуальная информационная система "Ситуационная осведомленность экипажа вертолета"

Система "Ситуационная осведомленность экипажа" входит в состав бортовых компьютерных систем, поддерживающих процесс решения экипажем задачи оперативного целеполагания. Она предъявляет экипажу непосредственные угрозы выполнению генеральной задачи вылета, целостности вертолета с определением для них так называемых "точек невозврата".

Ключевые слова: полетное задание, угрозы, осмотрительность, осведомленность, целеполагание, база знаний

Введение

При подготовке полета летательного аппарата (ЛА) или группы летательных аппаратов (самолетов, вертолетов) всегда ставится генеральная задача вылета (ГЗВ) и назначаются роли (ранги) ЛА в группе. В процессе выполнения полета в каждый текущий момент времени на любом ЛА группы с помощью алгоритмов деятельности экипажа (АДЭ) и алгоритмов, реализованных в бортовых цифровых вычислительных машинах (БЦВМ-алгоритмов), решаются задачи трех глобальных уровней управления (ГЛУУ):

- задачи оперативного целеполагания (I-ГЛУУ — первый глобальный уровень управления);
- задачи определения рационального способа достижения оперативно поставленной цели (II-ГЛУУ — второй глобальный уровень управления);
- задачи реализации принятого способа достижения оперативно поставленной цели (III-ГЛУУ — третий глобальный уровень управления).

Задачи I-ГЛУУ и II-ГЛУУ, которые называют тактическими, всегда решаются экипажем ЛА.

На необходимость поддержки БЦВМ-алгоритмами процесса решения тактических задач экипажем указывалось в многочисленных публикациях, в частности в работах [1–6]. В них была показана возможность разработки бортовых интеллектуальных систем, решающих тактические задачи (БИС-Т/З). Эти компьютерные системы должны вырабатывать и предъявлять экипажу (на информационно-управляющем поле кабины (ИУП)) рекомендации по способу оперативного решения тактической задачи, которая неожиданно возникла в полете ЛА.

Решение задач I-ГЛУУ и II-ГЛУУ на ЛА 4-го поколения осуществляется экипажем без какой-либо поддержки с помощью рекомендаций, оперативно вырабатываемых БЦВМ-алгоритмами. Для ЛА этого поколения БЦВМ-алгоритмы разрабатывались, главным образом, для решения задач III-ГЛУУ. При этом использовалась концептуальная модель "Эпизод". Эта модель содержит набор проблемных субситуаций (Пр/СС), выделенных из каждого этапа

(типовой ситуации (ТС)) полета. По каждой такой ПрС/С безотносительно к другим ПрС/С этой ТС инженерами разрабатывается свое алгоритмическое и индикационное обеспечение (АиИО): $АиИО = АДЭ + БЦВМ\text{-алгоритмы}$. При этом общую оперативную "системную увязку" такого бортового АиИО при решении тактических задач инженеры возлагают в полете на экипаж, не поддерживая его никакими оперативными рекомендациями. При использовании концептуальной модели ЛА "Эпизод" задачи I-ГЛУУ и II-ГЛУУ исчезают из поля зрения конструкторов бортового АиИО.

При появлении возможности реализовать алгоритмическую поддержку процесса принятия тактических решений экипажем ЛА перед инженерами, разрабатывающими бортовое АиИО, возникла необходимость перехода от концептуальной модели ЛА "Эпизод", которую они использовали до настоящего времени и которая не выделяет тактические задачи, к новой концептуальной модели ЛА "Этап" [1].

Для решения тактических задач на борту ЛА нового поколения будут размещаться БИС-Т/З двух классов: БИС_ I-ГЛУУ и БИС_ II-ГЛУУ.

Бортовые интеллектуальные системы I-ГЛУУ на борту летательных аппаратов

Интеллектуальные системы, решающие задачи I-ГЛУУ, работают на всех этапах полета ЛА. Они должны информацией и рекомендациями поддерживать следующие составляющие процесса решения этих задач экипажами ЛА: осмотрительность экипажа, ситуационную осведомленность экипажа, ситуационную уверенность экипажа.

Опишем эти составляющие (табл. 1).

- **Осмotrительность экипажа** обеспечивается предъявлением ему на ИУП кабины потенциальных угроз целостности ЛА или выполнению им заданной ГЗВ. Для этого на ИУП создается информационная модель внешней и внутрибортовой обстановки с представлением в ней потенциальных угроз. Модель реализуется БЦВМ-алгоритмами интегральной/комплексной обработки первичной информации, поступающей от бортовых измерительных систем, и БЦВМ-ал-

Составляющие решения задачи оперативного целеполагания

Составляющие задачи оперативного целеполагания	БЦВМ-алгоритмы обеспечения процесса решения задачи оперативного целеполагания	Информация экипажу на ИУП, представляемая БЦВМ-алгоритмами	Участие экипажа в работе БЦВМ-алгоритмов, обеспечивающих решение задачи оперативного целеполагания
Осмотрительность	Алгоритмы интегральной обработки первичной информации Алгоритмы выделения потенциальных угроз	Информационная модель внешней и внутрибортовой обстановки Потенциальные угрозы в информационной модели внешней и внутрибортовой обстановке	Нет Нет
Ситуационная осведомленность	ИИС СОЭ	НУГ в информационной модели внешней и внутрибортовой обстановке	Нет
Ситуационная уверенность	БОСЭС-целеполагание	Рекомендуемая текущая цель полета ЛА (рекомендуемая ТС)	1. Подтверждение НУГ. 2. Количественная оценка сложившейся ситуации

горитмами опознавания обнаруженных потенциальных угроз с классификацией их по типу. Работа таких БЦВМ-алгоритмов не требует ни диалоговых процедур с экипажем, ни информации от него с ИУП.

- *Ситуационная осведомленность* экипажа обеспечивается интеллектуальной информационной системой "Ситуационная осведомленность экипажа" (ИИС СОЭ). Эта система среди потенциальных угроз, выделенных в бортовой информационной модели внешней и внутрибортовой обстановки (см. выше), определяет те, которые непосредственно угрожают выполнению текущего этапа полета ЛА или целостности ЛА. Назовем их непосредственными угрозами (НУГ). Обнаруженные НУГ предоставляются экипажу на ИУП кабины ЛА в информационной модели внешней и внутрибортовой обстановки. Экипаж использует информацию с ИИС СОЭ для решения задачи оперативного целеполагания в соответствии с выполняемой генеральной задачей вылета и рангом ЛА в группе. Работа ИИС СОЭ также не требует ни диалоговых процедур с экипажем, ни информации от него с ИУП.
- *Ситуационная уверенность* экипажа обеспечивается бортовой оперативно советующей экспертной системой оперативного целеполагания (БОСЭС-целеполагание). Она при появлении непосредственной внешней и внутрибортовой угрозы успешному выполнению полетного задания заблаговременно предъявляет экипажу на ИУП рекомендацию по текущей цели полета ЛА. Эта рекомендация согласована с выполняемой ГЗВ и выделенной экипажем НУГ, поступившей из ИИС СОЭ [3]. Фрагменты таких рекомендаций экипажу по новой цели полета появляются на некоторых ЛА в ситуации, когда появляются угрозы, связанные непосредственно с существованием ЛА.

При работе БОСЭС-целеполагание предусматриваются диалоговые процедуры с экипажем и поступление в БОСЭС-целеполагание информации от него с ИУП [4].

Бортовая интеллектуальная информационная система

"Ситуационная осведомленность экипажа вертолета"

База знаний ИИС СОЭ состоит из трех блоков: блока наблюдаемых потенциальных угроз, блока выделения непосредственных угроз, блока классификации непосредственных угроз.

- *Блок наблюдаемых потенциальных угроз* получает от бортовых информационных средств, от БЦВМ-алгоритмов интегральной/комплексной обработки информации все обнаруженные потенциальные угрозы:

1) внешние угрозы;

2) внутрибортовые угрозы;

3) угрозу недостаточности бортовых расходных средств.

Далее в табл. 2 и 3 показаны некоторые угрозы из перечисленных типов и бортовые устройства, которые могут обнаруживать соответствующую угрозу. Обычно для потенциальных угроз инженеры собирают экспертные оценки времени, которое необходимо экипажу для принятия решений о возможности и типу противодействия угрозе. Эта оценка может использоваться в блоке выделения непосредственных угроз.

- *Блок выделения непосредственных угроз.*

В блоке в режиме реального времени по каждой обнаруженной потенциальной угрозе проводится прогноз ее развития и определение того момента времени, когда любое противодействие (из имеющихся в наличии противодействий) этой угрозе будет неэффективным. Назовем этот момент "точкой невозврата". Для его определения в этом блоке должны содержаться математические модели прогноза развития угрозы с процедурами выявления соответствующих "точек невозврата".

Приведенные в табл. 2 экспертные оценки времени, необходимого экипажу для принятия решения, должны учитываться при предъявлении экипажу на ИУП определившейся "точки невозврата".

Выявленные непосредственные угрозы передаются в блок классификации выделенных угроз, где

Внешние угрозы

№ п/п	Угрозы	Бортовые средства инструментального обнаружения	Классификация угрозы	Оценка времени, которое необходимо экипажу для принятия решения
1	Маршрут проходит через область опасной метеоситуации	Радиолокационная станция (РЛС)	Внш-2	От 4 с
2	Недопустимая близость к запретной зоне полета, границы которой заданы с помощью ИУП	БЦВМ	Внш-2	От 4 с
3	Опасность сближения с землей	Радиовысотомер (РВ)	Внш-3	От 4 с
4	Опасное сближение с другим ЛА при одиночном полете	Система предотвращения столкновений (TCAS)	Внш-3	От 4 с
5	Опасное сокращение дистанции между ЛА при полете в группе	TCAS	Внш-3	От 4 с
6	Опасность столкновения с препятствием	РЛС	Внш-3	От 4 с
7	Зона действия ПВО противника	РЛС, БКО	Внш-3	От 4 с
8	Атака вертолета ракетой воздух-воздух	Бортовой комплекс обороны (БКО)	Внш-3	От 2 с
9	Атака вертолета ракетой земля-воздух	БКО	Внш-3	От 2 с

Таблица 3

Внутрибортовые угрозы

№ п/п	Угрозы	Бортовые средства инструментального обнаружения	Обозначение ситуации	Оценка времени, которое необходимо экипажу для принятия решения
1	Повышенная вибрация вертолета	Датчики вибрации	Внт-2	От 4 с
2	Стружка в редукторе	Сигнализатор стружки	Внт-2	От 2 с
3	Недопустимая температура масла в редукторе	Сигнализаторы температуры	Внт-2	От 2 с
4	Недопустимое давление масла в редукторе	Сигнализатор давления масла	Внт-2	От 2 с
5	Отказ двигателя	Система регистрации состояния двигателя	Внт-3	От 4 с
6	Режим "Вихревое кольцо"	БЦВМ	Внт-3	От 4 с

происходит их классификация и ранжирование по моментам наступления "точек невозврата".

Приведем иллюстративный пример определения "точки невозврата" в ситуации отказа двигателей вертолета.

Пример. *Иллюстративная математическая модель определения "точки невозврата" для непосредственной угрозы "Отказ двигателей".* В случае остановки двигателей вертолет может опуститься на землю на авторотирующем винте. В этом режиме обычно возникает очень большая скорость снижения. Для ее уменьшения при подходе к земле давно предлагался очень простой прием "Подрыв": перед самым ударом о землю летчик резко увеличивает шаг несущего винта. Это создает дополнительную подъемную силу, тормозящую спуск вертолета. Несущий винт является как бы аккумулятором энергии, и эту энергию можно израсходовать для торможения спуска. Винт при этом быстро теряет свои обороты, и эффект торможения исчезает. Поэтому приемом "Подрыв" следует пользоваться на конечном участке снижения, обеспечив минимальную скорость снижения в момент касания земли.

Рассмотрим упрощенную математическую модель развития этой потенциальной угрозы при следующих предположениях:

- снижение вертолета на режиме авторотации происходит без горизонтального перемещения,

- "Подрыв" осуществляется на установившейся скорости спуска $v_{авт}$;
- после выполнения "Подрыва" возникает дополнительная подъемная сила, которая сообщает вертолету постоянное тормозящее ускорение $a_{п}$, длящееся $t_{п}$ с, достаточное для снижения скорости спуска вертолета до допустимой;
- при касании земли допустимая скорость вертолета должна быть не больше $v_{доп}$, которая определяется прочностью шасси вертолета;
- бортовой радиовысотомер (РВ) постоянно измеряет текущую высоту вертолета $H_{РВ}$ относительно плоской поверхности земли.

Тогда определение "точки невозврата" (остаток времени до подрыва) для НУГ "Остановка двигателя" осуществляется следующим образом: потребное тормозящее ускорение

$$a_{п} = \frac{v_{авт} - v_{доп}}{t_{п}};$$

высота подрыва

$$H_{подр} = v_{авт}t_{п} - a_{п}\frac{t_{п}^2}{2} = \frac{t_{п}}{2}(v_{авт} + v_{доп});$$

остаток времени до подрыва

$$t = \frac{H_{РВ} - H_{подр}}{v_{авт}}.$$

Математическая модель рассматриваемой непосредственной угрозы используется в базе знаний ИИС СОЭ-вертолета для расчета "точки невозврата" и передачи ее в "Блок классификации непосредственных угроз".

- *Блок классификации непосредственных угроз.*

В блоке для последующего решения задачи оперативного целеполагания в ИИС СОЭ должна быть выполнена классификация НУГ [4].

Внешние угрозы:

- ▲ при выполнении полета группой вертолетов/одним вертолетом могут возникать угрозы, влияющие на качество выполнения вертолетом ГЗВ (обозначим их Внш-1-1), угрозы опекаемому им другому объекту (обозначим их Внш-1-2) или команда с внешнего источника, предлагающая изменить/скорректировать выполняемую ГЗВ (обозначим эти угрозы Внш-1-3).

При этом момент обнаружения угрозы обеспечивает резерв времени экипажу на осмысливание ситуации и на выработку решения на противодействие угрозе;

- ▲ угрозы целостности вертолета, момент возникновения которых обеспечивает экипажу указанный выше резерв времени (обозначим их Внш-2);
- ▲ угрозы целостности вертолета, момент возникновения которых не обеспечивает экипажу указанный выше резерв времени (обозначим их Внш-3);

Внутрибортовые угрозы:

- ▲ при выполнении полета возникают угрозы, влияющие на качество выполнения ГЗВ самим вертолетом (обозначим их Внт-1). При этом момент обнаружения угрозы обеспечивает экипажу указанный выше резерв времени;
- ▲ угрозы целостности вертолета и здоровью его экипажа, момент возникновения которых обеспечивает экипажу указанный выше резерв времени (обозначим их Внт-2);
- ▲ угрозы целостности вертолета и здоровью его экипажа, момент возникновения которых не обеспечивает экипажу указанный выше резерв времени (обозначим их Внт-3).

ИИС СОЭ классифицирует наблюдаемые угрозы, выделяя отмеченные выше типы внешних и внутрибортовых угроз.

В табл. 2, 3 приведены примеры классификации некоторых внешних угроз (табл. 2), внутрибортовых угроз (табл. 3). Отдельным столбцом в таблицах отмечены бортовые средства инструментального обнаружения названных угроз и экспертные оценки времени, необходимого экипажу для принятия соответствующего решения.

Тщательно проведенный в 2015 г. специалистами ОАО "РПКБ" патентный поиск показал, что на бортах существующих вертолетов можно встретить фрагменты базы знаний системы ИИС-СОЭ-вертолета, выделяющие только определенный тип угроз. В ряде патентов кроме обнаружения угрозы

предлагается и способ противодействия ей, а это уже фрагмент базы знаний БОСЭС-целеполагание.

Материалов же по ИИС-СОЭ-вертолета, работающей по всей совокупности потенциальных угроз и выявлению среди них НУГ с позиции решения задачи оперативного целеполагания, не обнаружено.

ИИС-СОЭ-вертолета в бортовой информационной среде вертолета

На рисунке (см. третью сторону обложки) показано взаимодействие ИИС-СОЭ-вертолета:

- с системой подготовки вылета вертолета (предполетная информация: априорная информация об ожидаемых угрозах в предстоящем полете);
- с бортовыми информационными системами/устройствами;
- с ИУП кабины (МФИ — многофункциональные индикаторы, РИ — речевые информаторы, МФПУ — многофункциональные пульты управления);
- с БОСЭС-целеполагание.

Как видно из рисунка (см. третью сторону обложки), взаимодействия ИИС-СОЭ-вертолета с экипажем и БОСЭС-целеполагание, выходная информация системы (НУГ) предъявляется оператору на индикаторах ИУП и через бортовые речевые информаторы. Также отметим, что из ИИС-СОЭ-вертолета информация о появлении угрозы типа Внш-3 и Внт-3 также сразу поступает в БОСЭС-целеполагание [4].

Взаимодействие БИС_I-ГЛУУ с экипажем и другими бортовыми интеллектуальными системами тактического уровня описано в работе [7].

Заключение

1. Для поддержки процесса решения экипажем задачи оперативного целеполагания на борту вертолета необходимо размещение специальной интеллектуальной системы ИИС-СОЭ-вертолета. Система оперативно предъявляет экипажу на ИУП информацию о возникших НУГ, которые препятствуют выполнению вертолетом текущего этапа полета или угрожают его целостности. В ИИС-СОЭ-вертолета должна быть классификация НУГ по близости каждой из них к соответствующей "точке невозврата".

Непосредственную же помощь экипажу в решении задачи оперативного целеполагания оказывает БОСЭС-целеполагание.

База знаний ИИС-СОЭ-вертолета включает в себя три основных блока:

- базу данных наблюдаемых потенциальных угроз;
- блок выделения НУГ;
- блок классификации выделенных угроз.

2. Ключевым и наиболее трудоемким этапом создания ИИС-СОЭ-вертолета является разработка базы знаний системы и, в частности, создание для нее математических моделей прогноза развития

каждой потенциальной угрозы до превращения ее в НУГ с определением для этой угрозы "точки невозврата".

Список литературы

1. Федун Б. Е. Модель "Этап" для разработки облика бортовых интеллектуальных систем антропоцентрических объектов // *Онтология проектирования*. 2012. № 2 (4). С. 36—43.
2. Грибков В. Ф., Федун Б. Е. Бортовая информационная интеллектуальная система "Ситуационная осведомленность экипажа боевых самолетов" // *Интеллектуальные системы управления*. М.: Машиностроение, 2010. С. 108—116.
3. Желтов С. Ю., Федун Б. Е. Оперативное целеполагание в антропоцентрических объектах с позиции концептуальной модели "Этап". I. Структуры алгоритмов поддержки про-

цесса решения задачи экипажем // *Изв. РАН. ТиСУ*. 2015. № 3. С. 57—71.

4. Желтов С. Ю., Федун Б. Е. Оперативное целеполагание в антропоцентрических объектах с позиции концептуальной модели "Этап". II. Режимы работы бортовой оперативно-советующей экспертной системы и диалоги ее с экипажем // *Изв. РАН. ТиСУ*. 2016. № 3. С. 55—69.

5. Стефанов В. А., Федун Б. Е. Бортовые оперативно-советующие экспертные системы (БОСЭС) типовых ситуаций функционирования антропоцентрических (технических) объектов: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ, 2006. 192 с.

6. Системы управления вооружением истребителей: основы интеллекта многофункционального самолета / Под ред. акад. РАН Е. А. Федосова. М.: Машиностроение, 2005. 399 с.

7. Федун Б. Е. "Электронный летчик": "Точка невозврата" пройдена не будет. Бортовые оперативно-советующие экспертные системы тактического уровня для пилотируемых летательных аппаратов. М.: Авиапанорама, 2016. № 1. С. 9—20.

Onboard Intelligent Information System of the Situational Awareness of a Helicopter Crew

A. V. Kolisnichenko, Kamov Co.,

B. E. Fedunov, boris_fed@gosniias.ru, FGUP GosNIIAS, Moscow, 125319, Russian Federation

Corresponding author: Fedunov Boris E., Professor, D. Sc.,
Chief of the System Design Sector, FGUP GosNIIAS,
Moscow, 125319, Russian Federation, e-mail: boris_fed@gosniias.ru

Received on May 12, 2016

Accepted on June 04, 2016

During performance of a flight task (FT) by a helicopter (flight machine (FM)) the crew always has to solve the so-called tactical problems: the problem of the operative goal setting and the problems of designing of a way to achieve the operatively appointed purpose of the flight. The problem of the operative goal setting arises in a flight in case of occurrence of the direct external and intraonboard threats, which undermine performance of FT or threaten the integrity of FM. In this case the crew can demand to appoint a new current purpose of the flight, preferred to its carried out current purpose of FT. After a successful achievement of this new current purpose of the flight the crew solves the goal setting problem: a problem of return to performance of TF. Onboard computer systems were developed to help the crew solve the problem of the operative goal setting. They operatively ensure for the crew the discretion, the situational awareness, the situational confidence. The discretion of the crew is provided with the onboard algorithms of the complex processing of the information, which arrives from the onboard measuring systems. Those algorithms detect the external and intraonboard threats, which can prevent the performance of FT or threaten the integrity of FM. Those potential threats are shown to the crew on the information and control field (ICF) of the FM cabin. The situational awareness of the crew is ensured by the intelligent information system "Crew Situational Awareness" (IIS CSA). The system allocates the direct threats among the potential threats and defines for them the so-called "points of noreturn". The direct threats and their "points of noreturn" are shown to the crew on ICF. The ranging of the direct threats is used during decision making concerning an operative goal setting problem. The situational confidence of the crew is ensured with an onboard operatively advising expert system "Operative Goal Setting" (BOSES — goal setting). The system recommends to the crew the priority current purpose of the flight. In the article the structure of units of IIS CSA is described and an example is provided of the definition of a "point of noreturn" for a certain direct threat.

Keywords: flight task, threats, crew circumspection, crew situational awareness, crew situational confidence, knowledge base

For citation:

Kolisnichenko A. V., Fedunov B. E. Onboard Intelligent Information System of the Situational Awareness of a Helicopter Crew, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 703—708.

DOI: 10.17587/mau.17.703-708

References

1. Fedunov B. E. Model' "Etap" dlja razrabotki oblika bortovyh intellektual'nyh sistem antropocentricheskikh ob#ektov ("Phase" model for the development of image-board intelligent systems anthropocentric objects), *Ontologijaproektirovaniya*, 2012, no. 2 (4), pp. 36—43 (in Russian).
2. Gribov V. F., Fedunov B. E. Bortovaja informacionnaja intellektual'naja sistema "Situacionnaja osvedomlennost' ekipazha boevykh

samoletov" (Onboard information intellectual system "Situational awareness crew warplanes"), *Intellektual'nye sistemy upravleniya*, Moscow, Mashinostroenie, 2010, pp. 108—116 (in Russian).

3. Zheltov S. Ju., Fedunov B. E. Operativnoe celepolaganie v antropocentricheskikh ob#ektah s pozicii konceptual'noj modeli "Jetap". I. Struktury algoritmov podderzhki processa resheniya zadachi ekipazhem (The operational goal setting in anthropocentric objects from the perspective of a conceptual model of "Stage". I. Structure of algorithms for solving the problem of support crew process), *Izv. RAN, TiSU*, 2015, no. 3, pp. 57—71 (in Russian).

4. Zheltov S. Ju., Fedunov B. E. Operativnoe celepolaganie v antropocentricheskikh ob#ektah s pozicii konceptual'noj modeli "Jetap". II. Rezhimy raboty bortovoj operativno sovetujushhej ekspertnoj sistemy i dialogi ee s ekipazhem (The operational goal setting in anthropocentric objects from the perspective of a conceptual model of "Stage". II. Modes board promptly advising of expert system and its dialogue with the crew), *Izv. RAN, TiSU*, 2016, no. 3, pp. 55—69 (in Russian).

5. **Stefanov V. A., Fedunov B. E.** *Bortovye operativno-sovetujushhie ekspertnye sistemy (BOSJeS) tipovyh situacij funkcionirovanija antropocentricheskikh (tehniceskikh) ob#ektov* (Onboard operational advising expert systems (BOSES) typical situations functioning anthropocentric (technical) facilities), Moscow, Publishing house of MAI, 2006, 192 p. (in Russian).

6. **Fedosov E. A.** ed. *Sistemy upravlenija vooruzheniem istrebitelej: osnovy intellekta mnogofunkcional'nogo samoleta* (Weapons control

systems fighters: the basics of intelligence multi-purpose aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 399 p. (in Russian).

7. **Fedunov B. E.** *"Elektronnyj lechik": "Tochka nevozvrata" projdena ne budet. Bortovye operativno sovetujushhie ekspertnye sistemy takticheskogo urovnja dlja pilotiruemyh letatel'nyh apparatov* ("Electronic Pilot": "The point of no return" will not be passed. Onboard promptly advising the tactical level of expert systems for manned aircraft), Moscow, Aviaporama, 2016, no. 1, pp. 9–20 (in Russian).

УДК 681.5

DOI: 10.17587/mau.17.708-715

А. А. Большаков, д-р техн. наук, проф., aabolshakov57@gmail.com,

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет),

А. А. Кулик, канд. техн. наук, инженер-системотехник II кат., kulikalekse@yandex.ru,

Е. Н. Скрипаль, нач. отд. разработки комплексов, гл. конструктор комплексов,

И. В. Сергушов, первый зам. ген. директора, гл. конструктор,

ОАО "Конструкторское бюро промышленной автоматики", г. Саратов

Разработка системы управления безопасностью полета вертолета

Проведено исследование взаимодействия систем автоматического и электродистанционного управления, а также рассмотрены внешние и внутренние воздействующие факторы. Показана необходимость применения в составе комплексной системы управления летательными аппаратами системы управления безопасностью полета. Особенностью предложенной системы является использование и реализация в ее структуре алгоритмов нечеткой логики и экспертной системы. Предложенный подход позволяет создать систему, адаптивную к изменяющимся условиям полета летательного аппарата, повысить быстроту реакции системы при наступлении неблагоприятного события. Получена математическая модель вычислительного ядра системы управления безопасностью полета вертолета, позволяющая исследовать физические процессы, протекающие в системе. Проведен ее анализ на корректность согласно условиям Адамара. Предложена структурная схема системы управления безопасностью полета вертолета, реализация которой осуществляется на базе искусственного интеллекта. Рассматриваются различные аспекты применения экспертных систем и алгоритмов нечеткой логики в системе управления вертолетом. Особое внимание уделяется анализу взаимодействия системы с другими комплексами управления летательным аппаратом.

Ключевые слова: система управления безопасностью полета, электродистанционная система управления, экспертные системы, алгоритмы нечеткой логики

Введение

В современной авиационной технике большое внимание уделяется комплексным системам управления летательными аппаратами (КСУ ЛА) [1], функционирование которых направлено на улучшение пилотирования ЛА в различных режимах управления. Основными подсистемами КСУ являются комплексы электродистанционного и автоматического управления. Системы электродистанционного управления (ЭДСУ) предназначены для передачи управляющих сигналов от рычагов управления на рулевые поверхности по линиям электрической связи. Для реализации режимов автоматического управления ЛА применяются различные системы автоматического управления.

Применение КСУ в ЛА обуславливает высокие требования к ее элементам и устройствам по надежности и безопасности полета, а также к взаимодействию пилота с бортовыми системами управления. Поэтому, например, вероятность наступления отказа системы ЭДСУ должна быть менее 10^{-9} , что соответствует катастрофическому уровню отказо-безопасности для случая катастрофы. Одним из средств обеспечения надежности функционирова-

ния САУ, а также взаимодействия пилота с бортовым оборудованием является использование системы управления безопасностью полета (СУБ).

СУБ полета ЛА представляет комплекс контроля и управления, функционирование которого связано с обнаружением и устранением летных происшествий под воздействием внутренних и внешних факторов на земле и в воздухе.

В конце XX века в авиации стали появляться устройства обнаружения и предупреждения пилота о наступлении летного происшествия с использованием логических элементов, например, речевой информатор, относящийся к средствам голосового оповещения. При наступлении летного происшествия или отказе системы ЛА информатор выдает голосовую информацию с использованием набора правил, реализованных аппаратно в логической форме. Отметим, что предлагаемый подход относится к экспертным системам.

Далее стали появляться более совершенные методы и устройства повышения безопасности пилотирования аппарата. Так, КСУ [2] содержит интеллектуальную систему поддержки экипажа, предназначенную для передачи информации пилоту через

средства бортовой индикации и для коррекции работы систем управления ЛА с применением блока логики, формирующего управляющие сигналы в САУ и ЭДСУ.

Примером интеллектуальной поддержки действий летного экипажа является экспертная система [3], принцип действия которой основан на получении и оценке данных от сопрягаемого оборудования. Экспертная система позволяет провести распознавание наличия или отсутствия аварийной ситуации в процессе пилотирования ЛА, а также прогнозировать варианты ее развития и предотвращения. Другим примером устройств обеспечения безопасности полета ЛА являются системы, направленные на устранение происшествий на взлетно-посадочной полосе (ВПП) [4–5]. Среди зарубежных систем интеллектуальной поддержки принятия решений экипажа можно выделить устройство предупреждения столкновения ЛА с Землей на ВПП "Smart Landing", которое разработано компанией Honeywell Aerospace [6]. Устройство выполняет функции оповещения экипажа звуковыми и световыми средствами при превышении скорости снижения ЛА и неправильной конфигурации полета.

Наряду с разработкой экспертных систем предупреждения экипажа о наличии аварийной ситуации сотрудниками авиационных предприятий активно выполняются работы, направленные на повышение значений характеристик получения и обработки данных об условиях полета ЛА, например, с использованием методов и алгоритмов нечеткой логики [7].

Следует отметить, что СУБ должна удовлетворять высоким требованиям по быстродействию, надежности, адекватности оценки функционирования систем комплекса бортового оборудования, вероятности наступления летного происшествия и принятия решений по его устранению.

Таким образом, создание высоконадежной и точной системы безопасности полета ЛА является актуальной научно-технической задачей, решение которой связано с использованием средств искусственного интеллекта.

Постановка задачи

Целью работы является создание и исследование структуры системы управления безопасностью полета вертолета (СУБ), а также ее взаимодействия с другими подсистемами КСУ.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Исследовать взаимодействие ЭДСУ и САУ, с учетом внешних и внутренних воздействующих факторов.
2. Разработать структурную схему СУБ.
3. Исследовать влияние СУБ на другие системы КСУ по принципу действия и обмена информацией.
4. Построить математическую модель вычислительного ядра СУБ полета вертолета и проанализировать результаты математического моделирования.

Исследование взаимодействия ЭДСУ и САУ с учетом внешних и внутренних воздействующих факторов

Как правило, ЭДСУ и САУ взаимодействуют по линиям цифровой связи. При этом пилот передает управляющие сигналы на вход САУ и ЭДСУ через пульт и рычаги управления. В настоящее время существуют два основных способа передачи информации от устройств управления ЛА к его рулевым поверхностям: последовательное и параллельное. При последовательном управлении информация от рычагов и пульта управления пилота передается на вход электрогидроприводов (ЭГП) через вычислительные модули (ВМ) и блок микроконтроллеров (МК). Модуль реализует законы управления ЛА для обеспечения его устойчивости и управляемости, а также автоматического управления аппаратом. При этом микроконтроллеры передают управляющие сигналы на вход ЭГП в аналоговом виде, а также осуществляют контроль заданных значений параметров отклонения рулевых поверхностей по сигналам обратной связи. В некоторых схемах реализации КСУ возможен резервный способ управления рулевыми поверхностями от рычагов управления по линиям аналоговых (цифровых) сигналов, поступающих на вход микроконтроллеров. Такой способ применяется для управления полетом ЛА при отказе всех ВМ в системе.

Другим методом передачи информации в КСУ является параллельное расположение ВУП в ее структуре по отношению к ЭДСУ (рис. 1). Тогда команды, формируемые пилотом, передаются непосредственно на вход микроконтроллеров через рычаги управления. Блок микроконтроллеров реализует основные режимы пилотирования ЛА при ручном управлении и передает управляющие команды от ВМ на вход ЭГП при автоматическом управлении. Также микроконтроллеры осуществляют контроль и стабилизацию переменных отклонений рулевых поверхностей по отношению к их заданным значениям. Таким образом, микроконтроллеры контролируют и корректируют работу вычислителей, что позволяет своевременно обнару-

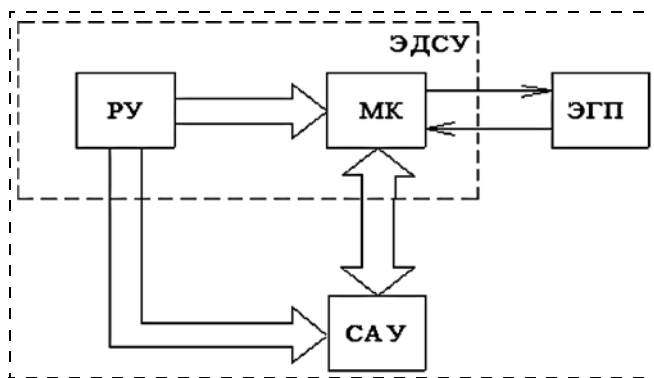


Рис. 1. Общая структурная схема взаимодействия САУ и ЭДСУ: РУ — рычаги управления ЛА; МК — микроконтроллеры; САУ — система автоматического управления; ЭГП — электрогидропривод

жить и устранить ошибку ВМ в режиме автоматического пилотирования ЛА.

Преимуществом параллельной передачи информации в КСУ ЛА является независимость управляющих команд, формируемых пилотом, от функционирования ВМ, что повышает надежность и безопасность пилотирования ЛА.

В процессе эксплуатации летной техники на нее оказывают воздействия внешние и внутренние факторы, превышение числовых и качественных значений которых может привести к нарушению режимов функционирования элементов ЛА и, как следствие, к наступлению летного происшествия. Следует отметить, что уровень числовых значений внешних воздействующих факторов определяется разработчиком элементов летной техники и ЛА согласно требованиям руководства КТ160D и (или) ГОСТ РВ 20.39.304—98. Как правило, основными внешними воздействующими факторами являются температура и высота окружающей среды, влажность, вибропрочность и виброустойчивость аппаратуры и ее элементов, взрывобезопасность, водонепроницаемость, устойчивость к пыли, песку, плесени, соляному туману, магнитному воздействию, перепаду электропитания и т.д.

Внутренними воздействующими факторами являются воздействия аппаратуры систем управления, а также пилота, которые могут привести к ее отказу и к ошибке формирования управляющих команд. Для исключения влияния таких воздействий целесообразно разрабатывать архитектуры устройств и систем управления с многократным резервированием, а также разнородным программным и аппаратным обеспечением. При этом разнородность элементов систем управления относится к вычислительным устройствам и интерфейсам передачи информации.

Следует отметить, что разнородность программного обеспечения обуславливается различием навыков разработчиков программ и структур команд библиотек. Например, компания ОАО "МИЭА" предлагает использовать в качестве вычислителей дублированные модули трех уровней, различные по аппаратному обеспечению на уровне производителя и по программному — на уровне разработчиков.

Согласно анализу структурных схем КСУ отказ вычислительных модулей способен привести к катастрофической ситуации, поэтому дополнительное применение системы безопасности управления полетом может значительно снизить вероятность наступления такого события.

Разработка структурной схемы СУБ КСУ для ПСВ

Создание СУБ полета является важной задачей при обеспечении надежности управления ЛА, причем СУБ должна выполнять следующие основные функции: прием, регистрация и обработка информации, получаемой от комплекса бортового обо-

рудования, систем управления воздушным судном; передача информации в сопрягаемое оборудование; распознавание особых ситуаций в полете, формирование их модели и прогнозирование дальнейших развитий; оценка критичности влияния на безопасность полета внешних и внутренних воздействующих факторов; информационное обеспечение действий экипажа в особых ситуациях.

Согласно основному перечню функций СУБ решает задачи, связанные с контролем, прогнозированием и принятием решений о состоянии бортового оборудования и условий полета вертолета. Поэтому ее реализацию целесообразно осуществлять с использованием средств искусственного интеллекта, что позволит создать адаптивную систему с возможностью эксплуатации в недетерминированных и распределенных условиях.

В настоящее время существуют различные методы применения искусственного интеллекта с использованием алгоритмов нечеткой логики, экспертных систем и нейронных сетей. В зависимости от области применения могут использоваться один или несколько методов искусственного интеллекта. Также большое значение имеют средства их физической реализации. Например, практическая реализация нейронных сетей в автономных системах управления связана с разработкой их структуры и алгоритмов обучения на базе нейронных процессоров, что является дорогостоящим и сложным процессом. При этом физические процессы, моделируемые нейронными сетями, в полной мере не изучены, что влияет на быстродействие и качество их функционирования. Поэтому в СУБ полета вертолета целесообразно использовать алгоритмы нечеткой логики и экспертные системы.

Известно, что во время эксплуатации воздушного судна на него воздействуют различные факторы, которые могут привести к наступлению как благоприятных, так и неблагоприятных событий. Следует отметить, что события могут быть единичными и совокупными с пространственно-временным распределением. Учитывая, что числовая оценка наступления события является трудоемким и долговременным процессом, можно отметить, что для оценки события и его последствий целесообразно использовать алгоритмы нечеткой логики. Эти алгоритмы позволяют сформировать совокупность выводов на основе набора правил, в которых переменными являются результаты сравнения с заданными значениями воздействующих факторов (больше, меньше, равно), например, правил следующего вида: "Если $f_{\text{виб}} \leq f_{\text{виб.зад}}$, то $f_{\text{виб}}$ соответствует нормальному режиму эксплуатации", где $f_{\text{виб}}$ — значения частоты вибрации, воздействующей на аппаратуру, $f_{\text{виб.зад}}$ — заданные значения частоты вибрации.

Опираясь на сравнительными значениями переменных воздействующих факторов, можно повысить быстродействие формирования выводов о наступле-



Рис. 2 Структурная схема СУБ ПСВ

нии события и адаптировать их к постоянно изменяющимся условиям полета вертолета.

Однако в процессе эксплуатации воздушного судна информация о наступлении событий нередко является недостаточной. Как правило, при пилотировании ЛА необходимо формировать прогноз последствий наступления события и предпринимать меры для его предотвращения. Поэтому в структуре СУБ кроме нечетких алгоритмов целесообразно использовать экспертные системы. На их вход поступает информация, формируемая алгоритмами нечеткой логики. При этом экспертная система на основе набора используемых правил формирует вывод о степени уверенности в наступлении последствий события, а также рекомендации по их предотвращению. Сформированные рекомендации передаются пилоту через информационные индикаторы. Следует отметить, что при положительном заключении о наступлении события для летной техники экспертная система не передает эту информацию пилоту, а также может использоваться непосредственно для управления объектом. Структурная схема СУБ полета перспективного скоростного вертолета с использованием средств искусственного интеллекта представлена на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что ядром СУБ полета вертолета являются устройства предварительной обработки данных, поддержки принятия решений и передачи данных. При этом предварительная обработка данных заключается в получении системой информационно-измерительных данных от комплекса бортового оборудования ЛА и формировании электрических сигналов, характеризующих превышение заданных переменных воздействующих факторов на объект управления. Затем на базе информации об изменении условий полета ЛА устройство поддержки принятия решений формирует вывод, характеризующий опасность полетного события и способы его устранения. Полученный вывод передается в устройство передачи данных, которое формирует электрические сигналы, поступающие на вход приборов индикации и оповещения, а также, при необходимости, в системы управления ЛА. Предложенная СУБ полета из-за двухуровневого распознавания изменения условий эксплуатации воздушного судна позволяет исключить ложное формирование данных о летном происшествии и его последствиях. При этом вычислительным ядром системы могут являться программно-логические интегральные схемы, а также преобразующие

устройства, тип которых зависит от вида интерфейсов обмена данными системы с периферийными устройствами комплекса бортового оборудования воздушного судна.

Отметим, что электрические сигналы, поступающие в системы управления ЛА, относятся к ограничивающим и не должны приводить к ухудшению управляемости и устойчивости полета ЛА. Кроме контроля сигналов, формируемых системой, в процессе ее разработки должны быть предусмотрены средства повышения ее надежности. Другой важной особенностью ее проектирования является реализация в программном комплексе средств искусственного интеллекта, что позволит адаптировать ее функционирование к изменению пространственно-временной информации в режиме реального времени. Примерами средств искусственного интеллекта являются алгоритмы нечеткой логики, нейронные сети и экспертные системы, которые реализуются в системе на основе совместного алгоритмического и программного обеспечения [8–10]. Так, устройства предварительной обработки информации реализуют алгоритмы нечеткой логики, при этом устройство поддержки принятия решений содержит модули прогнозирования, характерные для гибридных экспертных систем.

Таким образом, предложенная СУБ полета вертолета достаточно успешно и достоверно может определить угрозу наступления летного происшествия, прогнозировать ее последствия и формировать рекомендации пилоту по ее устранению. Также система передает в СУ ЛА сигналы, которые могут быть учтены в процессе ограничения расходов его управления и реконфигурации оборудования.

Исследование взаимодействия СУБ с ЭДСУ и САУ

Введение дополнительной системы управления приведет к изменению взаимодействия основных подсистем КСУ. На рис. 3 представлена структурная схема взаимодействия САУ, ЭДСУ и СУБ.

Согласно выполняемым функциям СУБ и структурной схеме ее взаимодействия с САУ видно, что обмен информацией между подсистемами КСУ имеет взаимосвязанный характер. Так, СУБ влияет на результат работы алгоритмов функционирования САУ. При этом информация о состоянии этих систем поступает на вход СУБ по линиям обратной связи. Основной функцией СУБ является обнару-

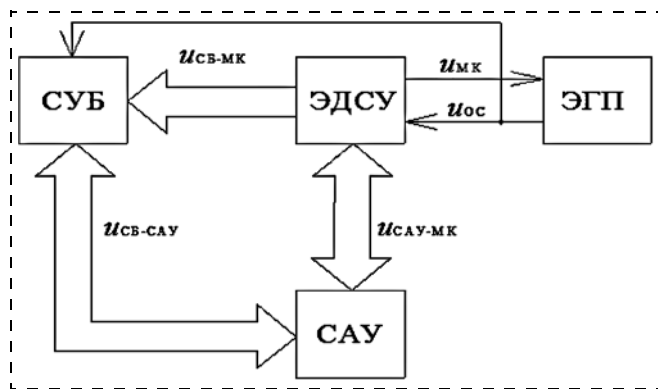


Рис. 3. Структурная схема взаимодействия СУБ с САУ и ЭДСУ: u_{CB-MK} — электрический сигнал обмена информацией между процессорами СУБ и микроконтроллерами ЭДСУ; u_{CAU-MK} — электрический сигнал обмена информацией между процессорами САУ и микроконтроллерами ЭДСУ; u_{CB-CAU} — электрический сигнал обмена информацией между процессорами СУБ и САУ; u_{CB} — управляющий сигнал электрогидроприводом, формируемый СУБ; u_{OC} — сигнал обратной связи электрогидропривода, характеризующий положение и скорость перемещения его выходного штока

жение отказа САУ и реконфигурация ее вычислителей. Формализованная запись взаимодействия СУБ с вычислителями САУ в рассматриваемом случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} &\text{если } u_{CAU} \neq u_{CAU \text{ зад}}, \\ &\text{то } u_{CAU} = \Delta u_{CAU} \text{ при } u_{CB \text{ упр}} \neq 0; \\ &\text{если } u_{CB} = 0, \text{ то } \Delta u_{CAU} = 0, \end{aligned}$$

где u_{CAU} — сигнал управления САУ; $u_{CAU \text{ зад}}$ — заданное значение управляющего сигнала САУ; Δu_{CAU} — реконфигурация управляющего сигнала САУ; $u_{CB \text{ упр}}$ — управляющий сигнал СУБ.

Также СУБ должна осуществлять взаимодействие с другими системами и устройствами комплекса бортового оборудования ЛА (рис. 4).

Согласно структурной схеме на вход СУБ поступает информация с руля управления (РУ) и

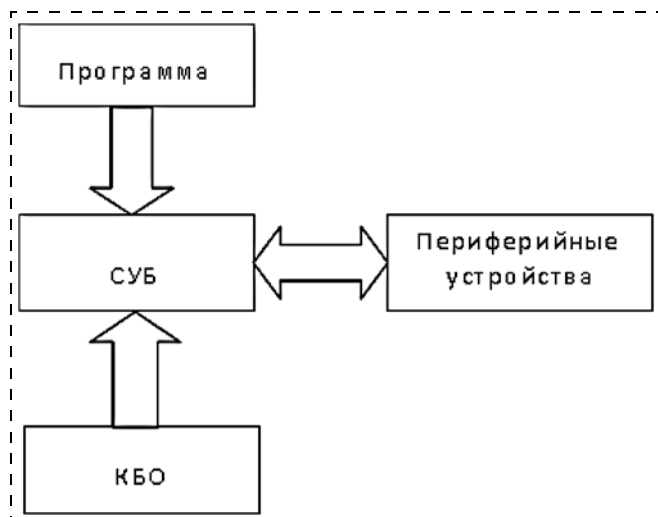


Рис. 4. Структурная схема взаимодействия СУБ с РУ и КБО

комплекса бортового оборудования (КБО), характеризующая состояние воздушного судна под воздействием внешних и внутренних факторов. При этом в системе используются алгоритмы нечеткой логики, набор правил экспертной системы, заданные значения переменных пилотирования ЛА и значения воздействующих факторов. В представленной схеме к периферийным устройствам относятся подсистемы КСУ и ЭГП. При этом взаимодействие СУБ с сопрягаемым оборудованием должно осуществляться по линиям цифровой связи с использованием протоколов стандарта ARINC 825 и RS-485. Эти протоколы обмена данными обладают высоким быстродействием, пропускной способностью, магистральным типом передачи информации.

Таким образом, взаимодействие СУБ с другими системами КСУ и устройствами КБО позволит осуществить контроль и оценку состояния пилотирования ЛА с высокой скоростью обработки входной информации, а также предотвратить наступление летного происшествия.

Построение математической модели вычислительного ядра СУБ вертолета

Согласно структурной схеме системы управления безопасностью полета вертолета (см. рис. 2) математическая модель вычислительного ядра СУБ представляет математический комплекс, описывающий вычислительные процессы, протекающие в ядре системы. Система управления безопасностью полета предназначена для распознавания аварийных ситуаций на борту воздушного судна, вызванных внутренними и внешними воздействующими факторами, а также для прогнозирования развития событий с выдачей информации о состоянии и изменении объекта управления пилоту. В состав модели должны входить переменные, характеризующие изменение условий полета вертолета (скорость, высота, угловые и линейные ускорения, положение объекта управления относительно систем координат, частота вращения несущего винта, погодные условия и т.д.), состояние бортового оборудования и пилота. Выходными переменными модели являются выводы экспертной системы, поступающие на информационные устройства. При этом входные переменные описываются точными числовыми значениями и сравнительными качественными величинами (хорошо, плохо, среднее, высокое, низкое).

Поэтому математическая модель вычислительного ядра системы управления безопасностью полета содержит математические модели нечеткой логики и формирования выводов устройств принятия решений (рис. 5).

Подготовительным этапом математического моделирования является введение нормировки точных значений входных переменных и граничных условий перехода состояния объекта управления.

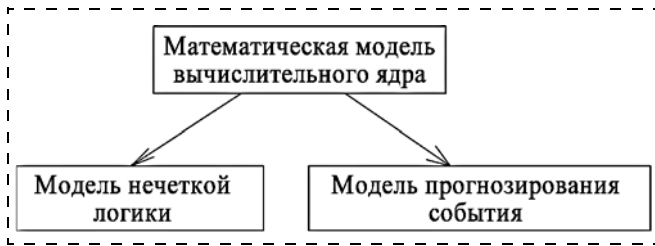


Рис. 5. Структурная схема математической модели СУБ вертолета

Выражение нормировки точных значений входных переменных имеет следующий вид:

$$\tilde{u}_{\text{вх}}(t) = u_{\text{вх}}(t)/u_{\text{вх max}} > 0, \quad (1)$$

где $\tilde{u}_{\text{вх}}(t)$ — безразмерная величина измеряемой переменной; $u_{\text{вх}}(t)$ — значение переменной величины, характеризующей состояние объекта управления; $u_{\text{вх max}}$ — максимальное значение входной величины.

В результате проведения расчетов изменение входных переменных будет находиться в диапазоне $[0; 1]$, при этом в него также войдут граничные значения перехода событий, относительно которых формируется набор правил принятия решений.

Таким образом, математическая модель вычислительного ядра системы управления безопасностью полета вертолета примет следующий вид:

$$\begin{aligned} u_1(t) &= f(\tilde{u}_1(t), \tilde{u}_1^0(t)); \\ u_2(t) &= f(\tilde{u}_2(t), \tilde{u}_2^0(t)); \\ u_3(t) &= f(\tilde{u}_3(t), \tilde{u}_3^0(t)); \\ &\dots\dots\dots \\ u_n(t) &= f(\tilde{u}_n(t), \tilde{u}_n^0(t)); \\ \tilde{Y}(t) &= \langle u_1(t); u_2(t); u_3(t); \dots, u_n(t) \rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

где $u_1(t); u_2(t); u_3(t); \dots, u_n(t)$ — переменные, характеризующие соответствие измеряемых переменных заданным требованиям; $\tilde{u}_1(t); \tilde{u}_2(t); \dots; \tilde{u}_n(t)$ — нормированные значения измеряемых переменных; $\tilde{u}_1^0(t); \tilde{u}_2^0(t); \dots; \tilde{u}_n^0(t)$ — заданные значения входных переменных системы, характеризующие изменение граничных значений состояния объекта управления; $\tilde{Y}(t)$ — переменная, характеризующая функцию принятия решения вычислительного ядра СУБ.

Следующим этапом моделирования является математическое описание формирования управляющего информационного сигнала вычислительного ядра, поступающего в сопрягаемое оборудование:

$$\begin{aligned} \langle u_{\text{упр}}(t), u_{\text{инф}}(t) \rangle &= f(Y(t), t); \\ Y(t) &= \tilde{Y}(t)u_{\text{пр}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $u_{\text{упр}}(t), u_{\text{инф}}(t)$ — управляющие и информационные сигналы, выдаваемые системой; $Y(t)$ — переменная функция принятия решения; $u_{\text{пр}}$ — преобразованная в размерную величину переменная, которая зависит от характеристик вычислительного устройства системы.

Из математической модели вычислительного ядра системы (1)—(3) видно, что ее особенностью является формирование переменных состояния условия управления воздушным судном и прогнозирование их развития. Характерной чертой применения математического аппарата нечеткой логики и экспертной системы является формализованная запись событий, влияющих на управление ЛА, а также формирование сигнала системы принятия решений. Кроме формализации записи переменных в аппарате применяется набор правил, характеризующийся процедурой сравнения текущего состояния условий полета с заданными.

В процессе выполнения работы осуществлено исследование математической модели вычислительного ядра СУБ на корректность по Адамару, согласно которому должны выполняться следующие условия: решение уравнений, совокупность которых образует математическую модель, существует, единственное, а также является устойчивым.

Для доказательства справедливости этих условий рассмотрим следующую задачу. Пусть в процессе эксплуатации ЛА в интервале времени $[t_1; t_2]$ произошел явный отказ датчиков воздушных сигналов, углового положения и вычислительного элемента системы автоматического управления вертолета. Тогда разовые команды, характеризующие отказ элементов комплекса бортового оборудования воздушного судна и поступающие на вход СУБ полета, имеют следующий вид:

$$u_{\text{вс}}(t) = 1, u_{\text{дл}}(t) = 1, u_{\text{вм}}(t) = 1, \quad (4)$$

где $t \in [t_1; t_2]$.

Здесь $u_{\text{вс}}(t), u_{\text{дл}}(t); u_{\text{вм}}(t)$ — сигналы, характеризующие отказы датчиков измерения вертикальной скорости и углов отклонения, а также вычислительного модуля системы управления ЛА, соответственно.

Подставляя переменные из выражения (4) в формулы (2), (3), получим

$$\begin{aligned} \tilde{Y}(t_1:t_2) &= \langle u_{\text{вс}} \vee u_{\text{дл}} \vee u_{\text{вм}} \rangle = 1; \\ u_{\text{инф}}(t_1:t_2) &= 5 \text{ В при } u_{\text{пр}} = 5 \text{ В.} \end{aligned} \quad (5)$$

Из решения видно, что система формирует информационный сигнал, характеризующий потерю управляемости ЛА до второго уровня [7]. Тогда, применяя теорему Пикара о существовании и единственности решений к математической модели вычислительного ядра СУБ при заданных начальных условиях, можно доказать, что соотношения (2), (3) имеют единственное решение. Согласно теореме

решение единственное, если оно непрерывно и удовлетворяет условию Липшица.

1. Исследование решения (5) на непрерывность в момент времени t_k :

а) $u_{\text{инф}}(t_k) = 5 \text{ В}$, где $t_k \in [t_1; t_2]$ — решение в точке t_k существует;

$$\text{б) } \lim_{t \rightarrow t_k - 0} u_{\text{инф}}(t) = \lim_{t \rightarrow t_k + 0} u_{\text{инф}}(t) = 1; \quad (6)$$

$$\text{в) } \lim_{t \rightarrow t_k - 0} u_{\text{инф}}(t) = u_{\text{инф}}(t_k) = 1.$$

2. Выполнение условия Липшица:

Пусть $\exists (t_{k1}, t_{k2}) \in [t_1; t_2]$, тогда $u_{\text{инф}}(t_{k1}) = 5 \text{ В}$, $u_{\text{инф}}(t_{k2}) = 5 \text{ В}$ и выполняется условие:

$$|u_{\text{инф}}(t_{k1}) - u_{\text{инф}}(t_{k2})| \leq M|t_{k1} - t_{k2}|. \quad (7)$$

Из соотношений (6), (7) видно, что решение математической модели вычислительного ядра системы является непрерывным и удовлетворяет условию Липшица, что соответствует выполнению требований теоремы Пикара и свидетельствует о единственности решения модели.

Следующим этапом доказательства корректности математической модели является исследование ее решения на устойчивость, что выражается в количественной оценке качества решения математической модели, являющейся величиной, характеризующей отклонение значений экспериментальных исследований объекта моделирования от значений, полученных в процессе математического моделирования.

Известно, что изменение начальных условий моделирования и входных переменных модели не должно приводить к ухудшению качества решения задачи, тогда решение считается устойчивым.

Пусть на вход системы подается сигнал с некоторым приращением $\Delta x_{\text{вх}}$, тогда выходной сигнал не должен превышать значение K , которое определяет из соотношения

$$K = |u_{\text{вых.эксп}} - u_{\text{вых.мод}}|/|u_{\text{вых.эксп}}|, \quad (8)$$

где $u_{\text{вых.эксп}}$, $u_{\text{вых.мод}}$ — экспериментальные и модельные выходные значения объекта моделирования, $K = [0, 0,05]$.

В математической форме записи условие устойчивости решения математической модели (1)–(3) примет следующий вид:

$$\exists \Delta x_{\text{вх}} \in u_{\text{вх}} : \forall u_{\text{вых}} \in [0; T]: |u_{\text{вых.эксп}} - u_{\text{вых.мод}}|/|u_{\text{вых.эксп}}| = K. \quad (9)$$

Если условие (9) выполняется, то решение математической модели является устойчивым.

Известно, что

$$u_{\text{вых.эксп}}(t_1, t_2) = u_{\text{инф.эксп}}(t_1, t_2) = u_{\text{пр.аппар}} \cdot \tilde{Y}(t_1, t_2), \quad (10)$$

где $\tilde{Y}(t_1, t_2) = 1$,

$$u_{\text{пр.аппар}} = 4,99 \text{ В, тогда } u_{\text{вых.эксп}}(t_1, t_2) = 4,99,$$

где $u_{\text{инф.эксп}}(t_1, t_2)$ — экспериментальные значения информационного сигнала; $u_{\text{пр.аппар}}$ — аппаратный сигнал преобразования вычисленного сигнала $\tilde{Y}(t_1, t_2)$ в размерную величину.

Согласно выражению (5):

$$u_{\text{вых.мод}}(t_1, t_2) = u_{\text{инф.мод}}(t_1, t_2) = 5 \text{ В}. \quad (11)$$

Подставляя выражения (10), (11) в условие (9), получим $K = 0,01$, следовательно, условие (9) выполняется, и решение является устойчивым.

Таким образом, учитывая, что решение математической модели вычислительного ядра СУБ полета вертолета является единственным и устойчивым, можно заключить, что модель является корректной по Адамару. Полученная математическая модель может быть успешно применена в системах прогнозирования авиационных происшествий и неисправности бортового оборудования, а также в средствах бортовой индикации и информации.

Заключение

В процессе выполнения работы проведены исследования взаимодействия САУ и ЭДСУ с учетом внешних и внутренних воздействующих факторов. Это позволило оценить и показать необходимость применения в составе КСУ СУБ полета. Особенностью предложенной системы является использование и реализация в ее структуре алгоритмов нечеткой логики и экспертной системы. Предложенный подход позволяет создать систему, адаптивную к изменяющимся условиям полета ЛА, повысить быстродействие реакции системы при наступлении неблагоприятного события.

Также проведены исследования по взаимодействию СУБ с подсистемами КСУ и устройствами КБО, что позволило изучить совместную работу этих систем и обмен данными между ними. В процессе выполнения дальнейшей работы по вышеописанному направлению полученные результаты целесообразно использовать при реализации СУБ и КСУ для перспективных ЛА.

В результате выполненной работы получена математическая модель вычислительного ядра СУБ полета вертолета, позволяющая исследовать физические процессы, протекающие в системе. Также проведен анализ модели на корректность согласно критерию Адамара. Полученные результаты целесообразно использовать в процессе проектирования систем для обеспечения безопасности полета ЛА на этапе разработки алгоритмов их взаимодействия с внешним оборудованием и создания программно-математического обеспечения.

Список литературы

1. Сергушов И. В., Глазков В. П., Кулик А. А. Перспективы развития систем управления винтокрылыми летательными аппаратами // Тр. IV Междунар. науч. конф. "Проблемы управления, обработки и передачи информации (УОПИ—2015)". 2015. Т. 1. С. 37—41.
2. Сапогов В. А., Анисимов К. С., Новожилов А. В. Отказо-безопасная вычислительная система для комплексных систем управления полетом летательных аппаратов // Электронный журнал "Труды МАИ". 2008. № 45.
3. Система поддержки экипажа в опасных ситуациях. / Л. М. Берестов, Е. Г. Харин и др. // Патент на изобретение RU 2128854 G05D1/D00 от 10.04.1999.
4. Глубокая М. Г. Бортовая система поддержки принятия решений на этапе взлета пассажирского самолета // Техника воздушного флота. 2008. Т. LXXXII, № 1 (690). С. 21—30.
5. Шевченко А. М., Начинкина Г. Н., Солонников Ю. И. Моделирование средств информационной поддержки пилота

на этапе взлета самолета // Тр. Московского института электромеханики и автоматики (МИЭА). 2012. № 5. С. 54—64.

6. Технология предупреждения выкатывания самолета за пределы ВВП. URL: <http://www.ato.ru/content/tehnologii-dlya-preduprezhdeniya-vykatyvaniya-vozdushnogo-sudna-za-predely-vpp>

7. Федунев Б. Е., Прохоров М. Д. Вывод по прецеденту в базах знаний бортовых интеллектуальных систем. URL: <http://www.isa.ru/aidt/documents/2010-03/6372.pdf>.

8. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими процессами / Под ред. профессора А. А. Большакова. М.: Горячая линия — Телеком, 2016. 160 с.

9. Большаков А. А., Лачугин Д. В., Лобанов В. В. Проектирование программного комплекса адаптивной системы управления, сбора и анализа потоковых данных // Программная инженерия. 2015. № 2. С. 13—22.

10. Большаков А. А., Кулик А. А., Глазков В. П. Использование нейросетевого компенсатора для стабилизации движения полуавтоматической протезируемой системы // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 18—22.

Designing the Security Control System for Helicopter

A. A. Bolshakov, aabolshakov57@gmail.com✉,

Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University),
Saint-Petersburg, 190013, Russian Federation,

A. A. Kulik, kulikalekse@yandex.ru, E. N. Scripal, I. V. Sergushov,
JSC "Design Bureau of Industrial Automation", Saratov, 41005, Russian Federation

Corresponding author: Bolshakov Alexander A., Professor of the Department
"Computer Aided Design and Management", Saint-Petersburg State Institute of Technology
(Technical University), Saint-Petersburg, 190013, Russian Federation,
e-mail: aabolshakov57@gmail.com

Received on June 06, 2016

Accepted on June 30, 2016

It has been a study of interaction and automatic by-wire control systems, as well as external and internal influencing factors. It was shown the need for application in the complex aircraft control system safety management system. A feature of the proposed system is the use and realization in its structure algorithms, fuzzy logic and expert systems. The proposed approach makes it possible to create a system, adaptive to changing the aircraft flight conditions, increase the speed of reaction of the system upon the occurrence of adverse events. It was the mathematical model of computing the core safety management system of the helicopter, which allows to investigate the physical processes occurring in the system. This analysis was conducted by according to the conditions Hadamard correctness. Was offered a block diagram of the safety management system of the helicopter flight, the implementation of which is carried out on the basis of artificial intelligence. The article considers various aspects of the application of expert systems and fuzzy logic in control helicopter system. Special attention is given to the analysis of the interaction of the system with other complexes of control of the aircraft.

Keywords: the security control system, fly-by-wire control system, expert system, fuzzy logic algorithms

For citation

Bolshakov A. A., Kulik A. A., Scripal E. N., Sergushov I. V. Designing the security control system for helicopter, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. no. 10, pp. 708—715.

DOI: 10.17587/mau.17.708-715

References

1. Sergushov I. V., Glazkov V. P., Kulik A. A. Prospects for the development of control systems rotorcraft, *Problems of management, processing and transmission of information (UOPI 2015): Proc. tr. IV International. Conf.*, 2015, vol. 1, pp. 37—41 (in Russian).
2. Sapogov V. A., Anisimov K. S., Novozhilov A. V. Fail-safe computer system for complex of aircraft flight control systems, *Electronic journal "Proceedings of the MAI."*, 2008, no. 45 (in Russian).
3. Crew support system in dangerous situations, L. M. Berastau, E. G. Harin et al., *Patent for invention RU 2128854 G05D1 / D00 on 10.04.1999* (in Russian).
4. Glubokya M. G. Onboard decision support system on passenger aircraft takeoff stage, *Air Force Technology, that LXXXII, 1 (690)*, 2008, pp. 21—30 (in Russian)

5. Shevchenko A. M., Nachinkina G. N., Solonnikov Y. I. Modeling tools to inform the pilot of the aircraft at the stage of take-off, *Proceedings of the Moscow Institute of Electromechanics and Automation (MIEA)*, 2012, no. 5, pp. 54—64 (in Russian).

6. Prevention technology rolling out of the aircraft beyond GDP, available at: <http://www.ato.ru/content/tehnologii-dlya-preduprezhdeniya-vykatyvaniya-vozdushnogo-sudna-za-predely-vpp> (in Russian).

7. Fedunov B. E., Prokhorov M. D. Conclusion on the precedent knowledge bases airborne intelligence systems, available at: <http://www.isa.ru/aidt/documents/2010-03/6372.pdf> (in Russian).

8. Bolshakov A. A. ed. Intelligent organizational and technical process control systems, Moscow, Hotline — Telecom, 2016, 160 p. (in Russian).

9. Bolshakov A. A., Lachugin D. V., Lobanov V. V. Designing software system adaptive control system, the collection and analysis of streaming data, *Software Engineering*, 2015, no. 2, pp. 13—22 (in Russian).

10. Bolshakov A. A., Kulik A. A., Glazkov V. P. Using neural network compensator to stabilize the movement of semi-bridged system, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 1, pp. 18—22 (in Russian).

А. В. Лопота, директор-главный конструктор, канд. экон. наук, alopota@rtc.ru,
Государственный научный центр Российской Федерации
Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники
и технической кибернетики (ГНЦ РФ ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург

Робототехника и образование в условиях перехода к высокотехнологичному обществу

Обсуждаются основные тенденции развития робототехники в условиях перехода к высокотехнологичному обществу и связанные с ними вопросы образовательной подготовки кадров на примере деятельности ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, СПбПУ и СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Особое внимание обращается на проблемы искусственного интеллекта и группового применения роботов в условиях формирования киберфизических систем на базе сетевого взаимодействия автоматизированных технических устройств. В области образовательной робототехники приведен пример успешной реализации в ГНЦ РФ ЦНИИ РТК модели привлечения, обучения и трудоустройства кадров — "школа—вуз—предприятие".

Ключевые слова: робототехника, киберфизическая система, искусственный интеллект, групповое взаимодействие роботов, образовательная робототехника, мехатроника, робототехнические соревнования, Кубок РТК

О тенденциях развития робототехники

Переход к эпохе высокотехнологичного общества характеризуется возникновением новых подходов к производству и потреблению, направленных на повышение эффективности производства, исключение "механистического" человеческого труда и сохранение экологии.

Ведущие промышленные страны готовятся к усилению мировой конкуренции и разрабатывают новые программы развития [1—4].

По мнению одного из ведущих специалистов в области Интернета будущего, профессора Вольфганга Вальстера¹, киберфизические системы в корне изменят традиционную логику производства, поскольку каждый рабочий объект будет сам определять, какую работу необходимо выполнить.

Производственное оборудование и продукты станут активными системными компонентами, управляющими производственными и логистическими процессами. В их состав войдут киберфизические системы, связывающие виртуальное пространство Интернета с реальным физическим миром.

Машины будущего будут отличаться от существующих мехатронных систем наличием способности взаимодействовать со своим окружением, планиро-

вать и адаптировать свое поведение к изменению условий, учиться новым моделям и линиям поведения.

Это позволит обеспечить возможность эффективного выпуска минимальных партий изделий в большом числе вариантов при быстром внесении изменений в конечную продукцию.

Применение датчиков, встроенных в исполнительные механизмы, обеспечение межмашинного обмена данными и использование активной семантической памяти приведет к появлению новых методов оптимизации, направленных на сохранение ресурсов в производственной среде.

К 2030 г. Германия планирует полностью перейти на систему интернетизированной промышленности. Немецкое правительство инвестирует в эту область около 200 млрд евро. Аналогичные программы запущены в Нидерландах, Франции, Великобритании, Италии, Бельгии и других странах.

В США в 2012 г. была создана некоммерческая Коалиция лидеров умного производства. В нее входят промышленники, поставщики, ИТ-компании, госведомства, университеты и лаборатории. Цель организации — создать открытую умную платформу для промышленных ИТ-приложений.

В 2014 г. компании General Electric, AT&T, Cisco, IBM и Intel создали Консорциум промышленного Интернета (Industrial Internet Consortium), объединяющий сегодня 170 организаций. Цель некоммерческого объединения — устранение барьеров между различными технологиями для того, чтобы обеспечить максимальный доступ к большим данным и усовершенствовать интеграцию физической и цифровой среды.

¹ Главный исполнительный директор, а также Директор по технической и научной работе в Немецком исследовательском центре искусственного интеллекта (DFKI) в Кайзерслаутерне, Саарбрюккене, Бремене и Берлине; член научно-исследовательского союза при Федеральном правительстве; Председатель Высшего консультативного органа в Евросоюзе в области Интернета будущего (программа FI-PPP).

В России признаки "четвертой промышленной революции" тоже уже обозначились. В августе 2015 г. "Российские космические системы" (РКС) и "Ростелеком" подписали меморандум о создании Ассоциации содействия развитию Промышленного Интернета "Национальный консорциум Промышленного Интернета" на международном авиакосмическом салоне МАКС-2015. Цель ассоциации — внедрение технологий промышленного Интернета в российское производство, а также обеспечение межотраслевой интеграции решений в этой сфере за счет объединения усилий крупнейших отраслевых компаний и научно-исследовательских организаций.

Для высокотехнологичного общества характерны требования высокой эффективности не только в области промышленного производства, но и в остальных сферах человеческой деятельности, в частности, обороны и безопасности.

В качестве примера можно привести развиваемую и реализуемую в последнее десятилетие концепцию сетецентрической войны, в которой любое вооруженное формирование представляется в виде компьютерной сети. Она объединяет элементы трех видов: средства обнаружения и отслеживания объектов противника (сенсоры), устройства воздействия на обнаруженные объекты (акторы) и информационно-управляющие системы (процессоры).

Концепции умного производства и сетецентрической войны имеют общую идеологическую основу и неосуществимы без создания нового поколения роботов, обладающих как минимум искусственным интеллектом, способных приспосабливаться и работать в неструктурированной среде, эффективно и безопасно взаимодействовать между собой и с человеком.

Уровень искусственного интеллекта связан, прежде всего, с развитием иерархической структуры модели среды путем формирования все более обобщенных уровней ее представления. От образов внешней среды, непосредственно воспринимаемых сенсорами системы, необходимо переходить к описаниям, позволяющим осуществлять интерпретацию и анализ.

Можно, конечно, называть технологиями искусственного интеллекта способность компьютеров решать информационные задачи, определять, что изображено на картинке или переводить звучание голоса в текстовую форму. Но всем понятно, что наличие искусственного интеллекта мы заподозрим только в той машине, которая будет способна не просто оперировать информацией, а в той или иной степени понимать ее смысл.

Главная проблема, связанная с пониманием естественного языка, — это множественность трактовок, которая может возникать у одного и того же слова в зависимости от контекста фразы. При переходе в специализированную область оказывается, что тематика определяет практическую единственность возможных трактовок. В этом случае успешность работы программы значительно возрастает. Прием перехода к узкой специализации применим

не только к анализу естественного языка, но и к анализу изображений. На этом же принципе строятся системы управления автомобилем без водителя.

Многие задачи, подобные беспилотному вождению, можно успешно решать даже без использования технологий искусственного интеллекта. Нейронные сети с глубоким обучением (Deep learning) достаточно хорошо подходят там, где "программирование в лоб" заходит в тупик. Оказывается, что значительно проще "дать" нейронной сети огромный массив примеров и тем самым обучить ее правильной классификации, чем пытаться самому описать все закономерности и реакцию на них. Простота получения результата в этом случае компенсирует сложность обучения.

Тренировки нейронных сетей, состоящих из большого числа элементов, на огромном числе примеров требуют большого объема вычислений. Традиционные CPU оказываются слишком медленными. Единственный выход заключается в распараллеливании вычислений с помощью графического процессора, который изначально создавался для формирования видеоизображений. Востребованность на рынке нейронных сетей побудила производителей графических процессоров к созданию соответствующего программного обеспечения, облегчающего труд разработчиков (компания NVIDIA).

Несмотря на очевидные преимущества автономных интеллектуальных роботов, одиночное устройство не может быть использовано для выполнения крупномасштабных задач, так как обладает сравнительно небольшими возможностями. Решением является одновременное применение нескольких роботов. Преимущества группового применения роботов очевидны. Во-первых, это больший радиус действия, во-вторых, расширенный набор выполняемых функций и, наконец, более высокая вероятность выполнения задания, достигаемая за счет возможности перераспределения целей между роботами группы в случае выхода из строя некоторых из них.

Такие сложные задачи, как масштабное исследование и зондирование поверхности других планет, сборка сложных конструкций в космосе и под водой, участие в боевых операциях и разминировании территорий могут быть эффективно решены роботами только при их групповом взаимодействии. Особое значение групповое взаимодействие роботов приобретает в такой перспективной области, как микроробототехника.

Для достижения конкретной цели, стоящей перед группой роботов, в случае детерминированной среды каждый робот может выполнять заранее определенную последовательность действий. В случае динамически меняющейся среды эта последовательность должна быть выработана системой управления группой в процессе достижения цели. Действия роботов должны быть определенным образом скоординированы, что и составляет основную цель технологии группового управления.

Решение рассмотренных выше проблем требует консолидации разработчиков робототехнических комплексов со специалистами смежных научно-технических направлений, включая специалистов в области технической кибернетики.

Образовательная робототехника

Компетенции Российской Федерации на рынке робототехники наиболее сильны в математическом моделировании, разработке ПО и создании уникальных технологических решений. Другими словами, они сосредоточены в тех областях, которые в настоящее время приносят максимальную прибыль и будут востребованы при переходе к следующему технологическому укладу. Это требует высококвалифицированного кадрового обеспечения, адаптированного к специфике работы в соответствующей области.

Среди факторов, ограничивающих развитие робототехники в России, необходимо отметить обострившийся в последние годы дефицит кадров и недостаточный уровень подготовки специалистов. В области робототехники подготовку специалистов проводят более 60 организаций высшего образования по специальностям "Мехатроника", "Мехатроника и робототехника", "Роботы и робототехнические системы".

Роботостроение — высокотехнологичная отрасль, имеющая первостепенное значение для социально-экономического развития государства, его обороны и безопасности. Современные робототехнические системы должны работать в экстремальных условиях, обладать чрезвычайной надежностью и соответствовать другим техническим требованиям, в зависимости от круга решаемых задач.

Необходимость в современных робототехнических средствах безопасности ставит перед специалистами задачу межотраслевого характера, связанную с реализацией принципов интеллектуализации, миниатюризации и унификации. Решение этой задачи невозможно без высококвалифицированного кадрового потенциала, способного владеть современным инструментарием для проектирования на базе новейших технологий.

Необходимо дальнейшее совершенствование системы подготовки и повышения квалификации специалистов данной отрасли, внедрение образовательных и профессиональных стандартов, соответствующих международному уровню. Формирование профессионального кадрового потенциала — одно из условий успешного развития отечественного роботостроения.

ГНЦ РФ ЦНИИ РТК решает важнейшие государственные задачи и ведет разработки в различных направлениях, которые требуют специалистов высочайшей квалификации. За последние годы при активной поддержке Минобрнауки РФ принят целый ряд шагов для повышения уровня подготовки специалистов. Был избран путь поиска талантов в процессе обучения и их индивидуальная

поддержка в освоении существующего конструкторско-технологического инструментария и инженерного творчества. Что касается конкретных действий, которые были предприняты для решения задачи подготовки высококвалифицированных научных и инженерных кадров, то они сводятся к следующему.

В Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого с участием ГНЦ РФ ЦНИИ РТК были созданы две кафедры: "Мехатроника и роботостроение при ЦНИИ РТК" и "Телематика при ЦНИИ РТК".

В Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина) создана базовая кафедра робототехники и автоматизации производственных систем.

В ГНЦ РФ ЦНИИ РТК создано студенческое конструкторско-технологическое бюро (СКТБ), в котором уже для студентов младших курсов профильных кафедр обеспечены необходимые условия для получения практических навыков по направлению "Мехатроника и робототехника". Деятельность СКТБ была взаимосвязана с соответствующими кафедрами вузов.

Базовая кафедра "Робототехника и Автоматика" входит в состав факультета электротехники и автоматизации ЛЭТИ, ведет учебную работу по направлениям подготовки магистров и специалистов высшей квалификации. Она имеет прикладную направленность по тематике ГНЦ РФ ЦНИИ РТК, который предоставляет кафедре материально-техническую базу и методическое сопровождение в целях организации и реализации практико-ориентированного учебного процесса. Его цель — подготовка кадров высшей квалификации, ориентированных на инновационную деятельность на основе научно-технического творчества, способных комплексно смотреть на задачу, имеющих знания и практический опыт по взаимодействию подсистем.

Выпускники кафедры, активно участвующие в этом учебном и творческом процессе, после окончания вуза являются готовыми специалистами, что в текущих условиях сокращает на 3...5 лет сроки профессионального развития. Наиболее успевающим студентам после окончания учебы предоставляется возможность поступления в аспирантуру и на постоянную работу в ГНЦ РФ ЦНИИ РТК.

На базе школы № 150 Калининского района при поддержке ГНЦ РФ ЦНИИ РТК будет создано робототехническое конструкторское бюро, а в Центре образования "Кудрово" в ЖК Новый Оккервиль, который откроется 1 сентября 2016 г., ГНЦ РФ ЦНИИ РТК совместно с ЛЭТИ будет проведен целый ряд мероприятий по поддержке научно-технического творчества школьников.

С 2013 г. ГНЦ РФ ЦНИИ РТК проводит Молодежные робототехнические соревнования "Кубок РТК", целью организации которых является создание условий для развития научно-технического творчества учащихся и профориентации молодежи по направлению мехатроники и робототехники.

Уникальность соревнований "Кубок РТК" — в применении разработанного специалистами ГНЦ РФ ЦНИИ РТК реконфигурируемого полигона, который, в зависимости от решаемых юными робототехниками научно-технических задач, позволяет менять виды препятствий. По замыслу ГНЦ РФ ЦНИИ РТК соревнования должны стимулировать у школьников и студентов интерес к новаторским разработкам в области робототехники для решения конкретных проблем, демонстрирующим умение грамотно строить алгоритмы и решать навигационные задачи. Успешный опыт проведения соревнований доказал актуальность данного мероприятия, его уникальность и целесообразность внедрения новых образовательных технологий данного формата в учебный процесс образовательных учреждений.

Для повышения интереса к робототехнике у школьников и студентов в ГНЦ РФ ЦНИИ РТК был создан Центр демонстрации и популяризации результатов и достижений в области робототехники и мехатроники, деятельность которого направлена на поиск и поддержку талантливой молодежи,

увлекающейся научно-техническим творчеством, привлечение внимания к разработкам в области робототехники, развитие лидерских качеств.

В Центре специалисты ГНЦ РФ ЦНИИ РТК демонстрируют ребятам разработки и делятся своим опытом по их созданию и применению, а также проводят ознакомительные лекции-экскурсии и практико-ориентированные семинары по робототехнике.

Таким образом, на базе ГНЦ РФ ЦНИИ РТК была успешно реализована модель привлечения, обучения и трудоустройства кадров школа—вуз—предприятие.

Список литературы

1. **Индустрия 4.0:** Производственные процессы будущего. Альманах "Управление производством". URL: <http://www.up-pro.ru/library/opinion/industriya-4.0.html>
2. **Что** нужно знать об Индустрии 4.0 и Интернете вещей; дайджест TheRunet. URL: <http://www.therunet.com/articles/4826-cto-nuzhno-znat-ob-industrii-4-0-i-internete-veschey>
3. **Промышленная** революция 4.0: угрозы реальные и мнимые; сайт konstruktor.net. URL: <http://konstruktor.net/podrobnее-au-promyshlennaja-revoljucija-40-ugrozy-realnye-i-mnimye.html>
4. **Потенциал** российских инноваций на рынке систем автоматизации и робототехники. Экспертно-аналитический отчет. Москва: ООО "Ларза" по заказу ОАО "РВК", 2014. 128 с.

Robotics and Education in the Context of Transition to the High-tech Society

A. V. Lopota, alopota@rtc.ru, Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, 194064, Russian Federation

Corresponding author: **Lopota Aleksandr V.**, Director-Chief Designer, Ph. D., Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, St. Petersburg, 194064, Russian Federation, e-mail: alopota@rtc.ru

Received on July 03, 2016

Accepted on July 22, 2016

The article is devoted to the main development trends in robotics in the context of transition to a high-tech society and the related issues connected with training of specialists using the example of the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics (RTC), St. Petersburg Politechnic University (SPb PU) and St. Petersburg Electrotechnical University "LETI". Special attention is attached to the problems of artificial intelligence and group application of robots in conditions of building of the cyber-physical systems based on the network communication of the automated technical devices. The area of the educational robotics is presented by the example of the successful implementation of the "school — higher educational institution — enterprise" model of the Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics intended for attraction, education and employment of young people.

Keywords: robotics, cyber-physical system, artificial intelligence, group interaction of robots, educational robotics, mechatronics, robotic contests, RTC championship

For citation:

Lopota A. V. Robotics and Education, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 716—719.

DOI: 10.17587/mau.17.716-719

References

1. **Индустрия 4.0:** Производственные вопросы будущего. Альманах "Управление производством" (Industry 4.0: Production processes of tomorrow Almanac "Production management"), available at: <http://www.up-pro.ru/library/opinion/industriya-4.0.html>

2. **Что** нужно знать об Индустрии 4.0 и Интернете вещей; дайджест TheRunet (What do you need to know about the Industry 4.0 and Internet of things; Digest TheRunet), available at: <http://www.therunet.com/articles/4826-cto-nuzhno-znat-ob-industrii-4-0-i-internete-veschey>
3. **Промышленная** революция 4.0: угрозы реальные и мнимые; сайт konstruktor.net (Industrial revolution 4.0: real and putative threats; web-site konstruktor.net), available at: <http://konstruktor.net/podrobnее-au-promyshlennaja-revoljucija-40-ugrozy-realnye-i-mnimye.html>
4. **Потенциал** российских инноваций на рынке систем автоматизации и робототехники (Potential of Russian innovations in the market for automation and robotics systems), expert-analytic report, Moscow, Larza JSC by order of RVC JSC, 2014, 128 p.



С 8 по 9 декабря 2016 г. в г. Тула
в Тульском государственном университете
состоится Третья всероссийская
научно-техническая конференция

"МЕХАТРОННЫЕ СИСТЕМЫ" **(ТЕОРИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ)**

Конференция посвящена 60-летию юбилею кафедры "Системы автоматического управления" нашего университета, 80-летию юбилею заслуженного деятеля науки РФ, д.т.н., профессора Н. В. Фалдина, 95-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора Б. М. Подчуфарова

Цель конференции

Обсуждение последних достижений в области разработки, проектирования и теории мехатронных систем и модулей. Установление и укрепление взаимовыгодных связей между научными, образовательными и производственными организациями и предприятиями, учеными и специалистами соответствующей области знаний. Определение направлений развития теории мехатронных систем.

НАПРАВЛЕНИЯ РАБОТЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- ◆ Проблемы проектирования и производства мехатронных систем и модулей.
- ◆ Системы управления.
- ◆ Робототехника и робототехнические системы.
- ◆ Автоматические приводы и их элементы.
- ◆ Интеллектуальные мехатронные системы.



Подробную информацию о конференции см. на сайте:
www.eltech.ru

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Е. В. Комиссарова*.

Сдано в набор 28.07.2016. Подписано в печать 12.09.2016. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН1016. 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.