

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ



Том 18
2017
№ 4

Рисунки к статье А. Ю. Будко, М. Ю. Медведева, Р. Ю. Будко, П. В. Ивашина,
 А. Я. Твердохлебова, Д. Н. Герасимова, В. В. Рахманова
 «КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ
 В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО СИГНАЛУ ИОННОГО ТОКА»

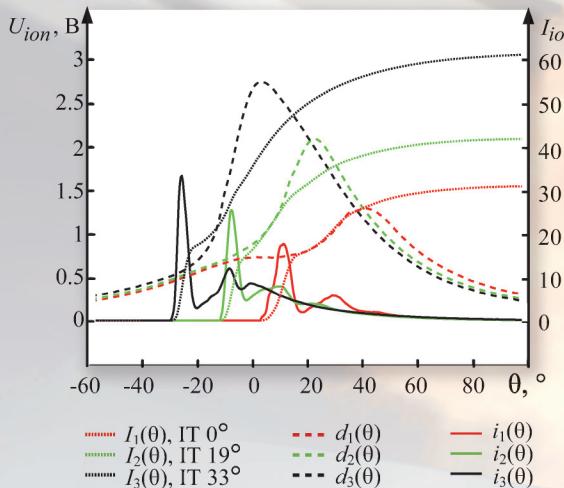


Рис. 7. Усредненные осциллограммы
 СИТ и давления сгорания
 при различных УОЗ

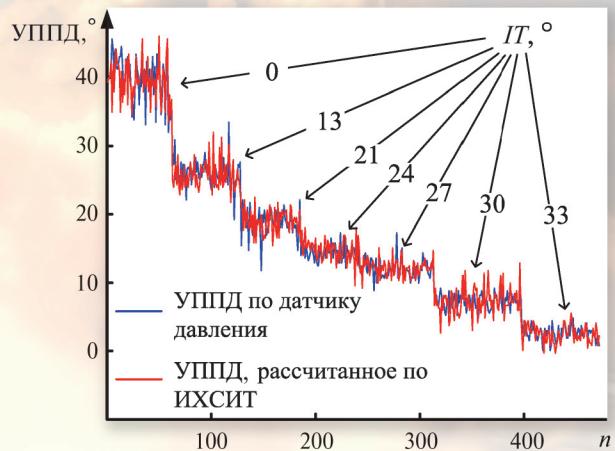


Рис. 8. Изменение измеренного по датчику
 давления и оцененного по ИХСИТ УППД
 при изменении УОЗ (ПГ),
 n – порядковый номер цикла

Рисунки к статье С. В. Алилуева, А. А. Большакова, А. Н. Попова, Д. П. Тетерина
 «МЕТОДИКИ И АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПРИВОДА
 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВИЖНОГО АППАРАТА»

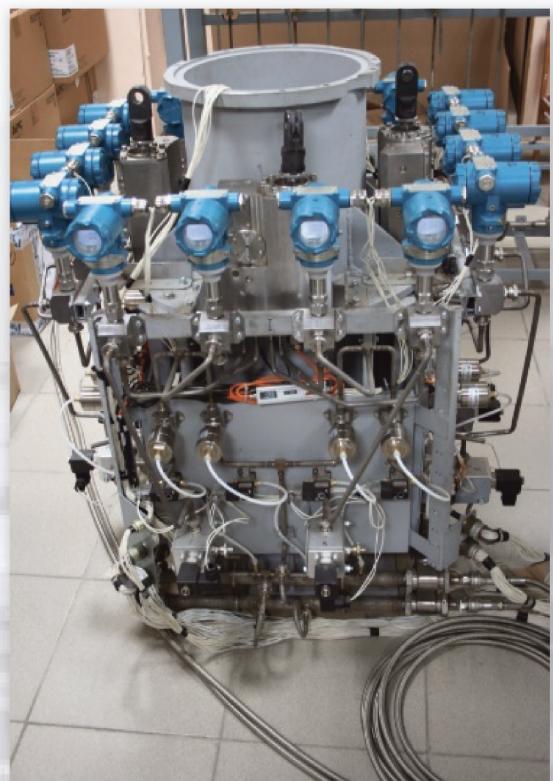
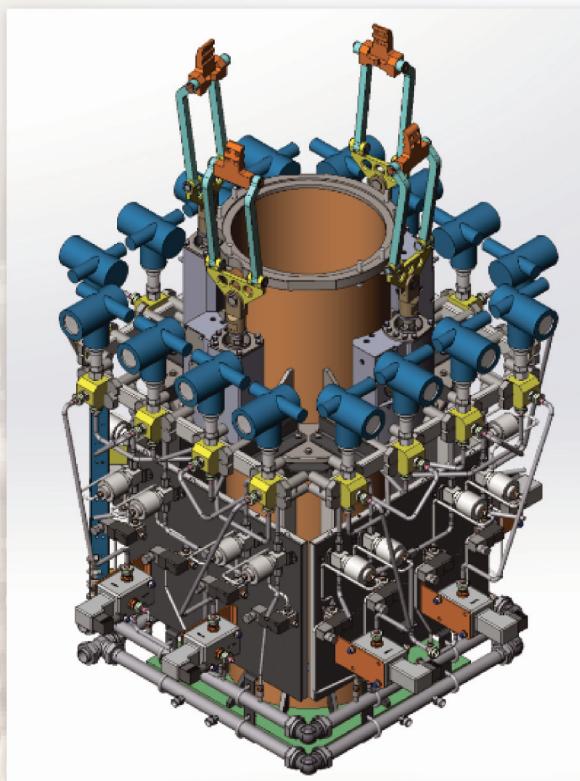


Рис. 9. Контрольно-проверочная аппаратура

**М
А
У****ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
МЕХАТРОНИКА,
АВТОМАТИЗАЦИЯ,
УПРАВЛЕНИЕ**

Издается с 2000 года

ISSN 1684-6427

**Том 18
2017
№ 4**

DOI 10.17587/issn.1684-6427

СОДЕРЖАНИЕ**МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ****Колосов О. С., Баларев Д. А., Пронин А. Д., Зуева М. В., Цапенко И. В.** Оценка частотных свойств динамического объекта с использованием импульсных тестирующих сигналов 219**Игумнов И. В., Күцый Н. Н.** Алгоритм параметрической оптимизации автоматических систем с ШИМ-элементом, имеющим в своем составе нейронную сеть 227**РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ****Дашевский И. Н., Князьев М. М., Суханов А. Н.** Разработка алгоритмов управления полуавтоматическим ортезом 233**Борисов А. В., Кончина Л. В.** Сравнительный анализ алгоритмов управления экзоскелетом со звеньями переменной длины 238**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ****Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипнов П. Е., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П.** Измерение радиальных зазоров с повышенной чувствительностью в расширенном диапазоне осевых смещений рабочего колеса турбины 246**Будко А. Ю., Медведев М. Ю., Будко Р. Ю., Ивашин П. В., Твердохлебов А. Я., Герасимов Д. Н., Рахманов В. В.** Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания по сигналу ионного тока 256**Алилуев С. В., Большаков А. А., Попов А. Н., Тетерин Д. П.** Методики и алгоритмы контроля и диагностики привода системы управления автономного подвижного аппарата 264**НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ****Корсун О. Н., Николаев С. В., Поплавский Б. К.** Алгоритмы проверки правильности полетных данных и оценивания нелинейностей при идентификации аэродинамических коэффициентов самолетов 270**Гошин Е. В., Усейнова И. Р.** Метод определения внешних параметров камеры по паре изображений с использованием дуальных кватернионов 279**Девятисильный А. С., Стоценко А. К.** Исследование относительного продольного движения автомобилей в системе "лидер—ведомый" 285

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

Vol. 18
2017
No. 4

MEKHATRONIKA, AVTOMATIZATSIIA, 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
 SOLONTSEV Yu. M., Russia, Moscow
 SOLOVIEV V. A., Russia, Moscow
 SUBUDHI B., PhD, Prof., India, Sundargarh
 VASILYEV S. N., Russia, Moscow
 YUSUPOV R. M., Russia, S.-Peterburg
 ZHELTOV S. Yu., Russia, Moscow

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:

BEZMENOVA 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
 IVENCHENKO 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 perspectives 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

Kolosov O. S., Balarev D. A., Pronin A. D., Zueva M. V., Tsapenko I. V. Evaluation of the Frequency Properties of the Dynamic Objects Using Pulse Testing Signals 219
Igumnov I. V., Kucyj N. N. The Algorithm of Parametric Optimization of Automated Systems with PWM Element that Incorporates Artificial Neural Network 227

ROBOTIC SYSTEMS

Dashevsky I. N., Knyazkov M. M., Sukhanov A. N. Development of the Control Algorithms for the Semiautomatic Orthosis Devices 233
Borisov A. V., Konchina L. V. Comparative Analysis of the Exoskeleton Control Algorithms with the Links of a Variable Length 238

CONTROL AND DIAGNOSTIC OF TECHNICAL SYSTEMS

Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. Measurement of the Radial Clearances with a Heightened Sensitivity in an Extended Range of the Axial Displacements of the Turbine Engine Disk 246
Budko A. Yu., Medvedev M. Yu., Budko R. Yu., Ivashin P. V., Tverdokhlebov A. Ya., Gerasimov D. N., Rakhmanov V. V. Control of the Combustion Process Parameters in ICE by the Ion Current Signals 256
Aliluev S. V., Bolshakov A. A., Popov A. N., Teterin D. P. Methods and Algorithms for Control and Diagnostics of the Steering Gear of the Autonomous Underwater Vehicles . 264

NAVIGATION AND CONTROL OF MOVING OBJECTS

Korsun O. N., Nikolaev S. V., Poplavskii B. K. Algorithms for Validation of the Flight Data and Evaluation of the Nonlinearities of the Aerodynamic Coefficients of the Aircraft 270
Goshin Ye. V., Useinova I. R. A Method for Determination of the Extrinsic Camera Parameters from a Pair of Images with the Use of Dual Quaternions 279
Devyatilny A. S., Stotsenko A. K. Research of the Relative Longitudinal Vehicle Motion for the Leader—Follower System 285

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

О. С. Колосов, д-р техн. наук, проф., KolosovOS@mpei.ru,

Д. А. Баларев, ст. преп., **А. Д. Пронин**, аспирант,

Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва,

М. В. Зуева, д-р биол. наук, руков. лабор., **И. В. Цапенко**, канд. биол. наук, ст. науч. сотр.,

Московский научно-исследовательский институт глазных болезней им. Гельмгольца, Москва

Оценка частотных свойств динамического объекта с использованием импульсных тестирующих сигналов*

Рассматривается задача идентификации динамических объектов двумя видами импульсных тестирующих сигналов: одиночным тестирующим импульсом на фиксированном интервале наблюдения и периодической импульсной последовательностью фиксированной частоты. Одиночный тестирующий импульс может быть удобен в работе адаптивных регуляторов, а импульсные тестирующие последовательности широко используются, например, для изучения характера изменений биопотенциалов сетчатки глаза (электроретинограмм) в целях получения дополнительных признаков для систем диагностики состояния такого объекта.

Ключевые слова: идентификация, частотные свойства, динамический объект, импульсный тестирующий сигнал, одиночный тестирующий импульс, периодическая импульсная последовательность, амплитудно-частотная характеристика

Введение

Идентификация параметров промышленного объекта по результатам активного эксперимента является хорошо проработанной на практике технической процедурой [1, 2]. При этом чаще всего используют два вида тестирующих сигналов. Это либо ступенчатый сигнал, реакция объекта на который в виде разгонной характеристики подвергается дальнейшей обработке, либо серия гармонических сигналов различной амплитуды и частоты, с помощью которых оцениваются отдельные точки амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) (также называемой в литературе комплексной частотной характеристикой (КЧХ)) объекта. Результатом такой идентификации обычно является аппроксимирующая (упрощенная) передаточная функция объекта в виде возможного последовательного соединения звена запаздывания, а также одного, двух или иногда нескольких апериодических звеньев. В силу того, что реальный объект, в общем виде, не является линейным во всем диапазоне входных воздействий, получаемая в результате передаточная функция отражает его свойства только в окрестности некоторого рабочего режима. Параметры этого режима могут со временем меняться, и, соответственно, будут меняться параметры передаточной функции по отношению к тем, которые были определены первоначально. Данное обстоятельство учитывается в алгоритмах

работы современных адаптивных регуляторов [3–5], которые периодически осуществляют подстройку своих параметров в зависимости от изменения параметров передаточной функции объекта. При этом изменения параметров передаточной функции объекта оцениваются адаптивным регулятором по изменению координат нескольких характерных точек АФЧХ объекта. Координаты этих точек в соответствии с методикой [4, 5] позволяют провести подстройку параметров регулятора. В соответствии с этой методикой адаптивный регулятор периодически добавляет к управляющему сигналу работающей замкнутой системы тестовые гармонические сигналы определенной частоты и амплитуды и анализирует отклик объекта на эти сигналы. Число таких сигналов, их амплитуда и длительность определяются параметрами передаточной функции объекта, а также уровнем и спектром помех в сигнале отклика объекта.

Существенным недостатком подобного метода идентификации параметров работающего в составе системы объекта является относительно большое время, отводимое на сам процесс идентификации, обусловленное необходимостью выжидания окончания переходных процессов и учета влияния аддитивных помех. Фактически подобная идентификация приводит к дополнительному зашумлению сигнала управления и, естественно, влияет на ход технологического процесса. Использование разгонных характеристик в практике оценки изменений параметров работающего объекта, несмотря на достаточную точность применяемых интегрально-модуляционных методов обработки [6, 7], плохо

* Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, проект 16-01-00086.

подходит для объектов без самовыравнивания и для замкнутых систем, функционирующих в условиях действия помех.

В связи с этим представляет интерес процесс идентификации, использующий импульсное тестирующее воздействие. В этом случае длительность процесса идентификации связывается с длительностью тестирующего импульса и длительностью окончания переходного процесса после снятия тестирующего сигнала. Длительность наблюдаемого переходного процесса зависит также от амплитуды тестирующего импульса и уровня аддитивных помех. Если далее воспользоваться разложениями в ряд Фурье наблюдаемого сигнала на выходе объекта и сигнала на его входе на интервале наблюдения, то сопоставление параметров гармоник разложений с одинаковыми номерами с определенной точностью может свидетельствовать о координатах соответствующих точек АФЧХ объекта. Эта точность напрямую зависит от интервала наблюдения и инерционных свойств объекта. Преимуществом такого подхода является его хорошая помехозащищенность, так как разложение в ряд Фурье — это интегральное преобразование, а также относительно невысокое время, отводимое на идентификацию.

Точно такой же подход можно использовать для оценки амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) динамического объекта при подаче на его вход периодических импульсов фиксированной частоты. Такой сигнал, например, используется для исследования сетчатки глаза как инерционного объекта с запаздыванием при анализе изменений биопотенциала сетчатки (так называемая ритмическая электроретинограмма (РЭРГ), которая является реакцией на периодические световые импульсы). Нелинейные свойства сетчатки как динамического объекта наблюдаются в этом случае в виде изменений АЧХ при изменении частот следования световых раздражителей.

Все перечисленные выше вопросы, связанные с особенностями идентификации динамического объекта одиночным тестирующим импульсом на фиксированном интервале наблюдения или периодической импульсной последовательностью фиксированной частоты являются предметом рассмотрения данной работы.

Оценка точек АФЧХ динамического объекта при импульсном тестирующем воздействии

▲ Разложение в ряд Фурье одиночного импульса на заданном интервале наблюдения

Одиночный импульс на заданном интервале наблюдения T для разложения в ряд Фурье можно заменить разложением импульсной последовательности $f(t)$ с периодом следования импульсов, равным интервалу наблюдения T . Вид такой по-

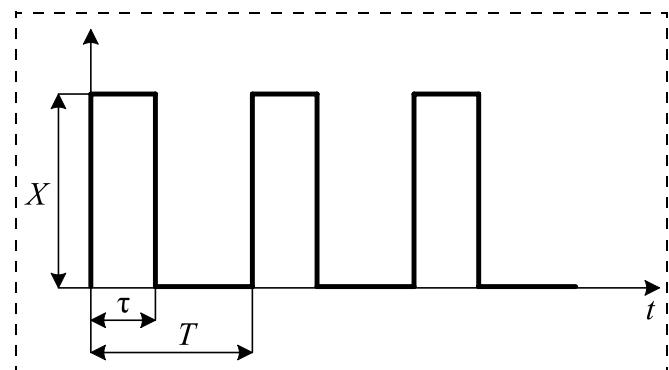


Рис. 1. Анализируемая последовательность импульсов

следовательности показан на рис. 1. Функция $f(t)$ может быть представлена в виде ряда Фурье:

$$f(t) = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \sin(n\omega t)) + \sum_{n=1}^{\infty} (b_n \cos(n\omega t)),$$

где коэффициенты ряда Фурье a_n , b_n , b_0 определяются по известным соотношениям (постоянная составляющая b_0 далее в анализе не участвует):

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt, \\ b_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt. \quad (1)$$

Амплитуды гармоник ряда с использованием соотношений (1) определяются как

$$c_{n\text{вх}} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = \frac{2X}{n\pi} |\sin(n\pi\gamma)|, \text{ где } \gamma = \frac{\tau}{T}. \quad (2)$$

Отметим, что в разложении (2) есть номера гармоник с нулевыми амплитудами, когда $n\gamma = 1, 2, 3, \dots$. Это обстоятельство необходимо учитывать, варьируя интервал наблюдения T , если необходимо исследовать окрестности частот, куда попадают эти гармоники.

▲ Разложение в ряд Фурье реакции линейного объекта на одиночный тестирующий импульс и оценка точек АФЧХ объекта

Будем считать, что линейный объект описывается передаточной функцией, корни знаменателя которой действительные и отрицательные. Нули числителя также действительные, но распределение их на действительной оси не оговаривается. Несложно показать с помощью теории вычетов, что подобный объект может быть представлен параллельно включенными апериодическими и реальными дифференцирующими звеньями первого порядка. Число таких звеньев будет равно числу корней знаменателя передаточной функции объекта. Таким образом, реакция такого объекта на одиночный тестирующий импульс будет складываться из суммы реакций на этот импульс апериодических и

реальных дифференцирующих звеньев. В связи с этим рассмотрим разложение в ряд Фурье реакции этих двух звеньев на одиночный тестирующий импульс.

Апериодическое звено

Апериодическое звено описывается уравнением

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = Kx,$$

где x — входной сигнал, y — выходной сигнал, T_0 и K — соответственно постоянная времени и коэффициент передачи звена. АФЧХ такого звена определяется амплитудно- и фазочастотными характеристиками:

$$|W(j\omega)| = A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}}; \quad \phi(\omega) = -\arctg \omega T_0. \quad (3)$$

Реакция апериодического звена на одиночный тестирующий импульс показана на рис. 2 и описывается соотношениями

$$f(t) = \begin{cases} XK(1 - e^{-\beta t}), & 0 \leq t \leq \tau; \\ XK(1 - e^{-\beta t}) - XK(1 - e^{-\beta(t-\tau)}), & \tau \leq t \leq T, \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{где } \beta = \frac{1}{T_0}.$$

Воспользовавшись (1), определяем коэффициенты разложения в ряд Фурье сигнала (4):

$$a_{n\text{вых}} = \frac{XK}{\pi} \left((1 - \cos x_1) + \frac{1}{1 + \alpha^2} ((\cos x_1 + \alpha \sin x_1) - 1 - k e^{-\alpha x_2}) \right); \quad (5)$$

$$b_{n\text{вых}} = \frac{XK}{\pi} \left(\sin x_1 + \frac{1}{1 + \alpha^2} (\alpha \cos x_1 - \sin x_1 - \alpha - k e^{-\alpha x_2}) \right), \quad (6)$$

$$\text{где } n\omega = \Omega, \quad \frac{\beta}{\Omega} = \alpha, \quad \Omega\tau = x_1, \quad \Omega T = x_2, \quad k = e^{\alpha x_1} - 1.$$

Отметим, что в соотношениях (5) и (6) последние слагаемые, зависящие от x_2 , при $T \rightarrow \infty$ стремятся к 0. В этом случае расчет модуля гармоник в разложении выходного сигнала (4) приводит к соотношению

$$c_{n\text{вых}} = \frac{XK}{\pi} \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} 2 \sin \frac{x_1}{2}, \quad (7)$$

$$\text{где } \frac{\alpha}{\sqrt{1 + \alpha^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}}.$$

Отношения амплитуд гармоник с одинаковыми номерами выходного сигнала (7) к входному (2) дают точное значение модуля АФЧХ апериодического

звена на частотах, связанных однозначно с номерами гармоники. Аналогичный результат получается при оценке фазочастотной характеристики звена с использованием соотношений (5) и (6).

Теоретически при тестировании апериодического звена одиночным импульсом экспоненты выходного сигнала с увеличением времени наблюдения T стремятся к нулю, но его значения не достигают. Поэтому при определении точек АФЧХ с использованием соотношений (5) и (6) неизбежно появление погрешности в оценке модуля и фазы вектора АФЧХ на комплексной плоскости. Эту погрешность вносят последние слагаемые в выражениях (5) и (6). Вместе с тем, абсолютные значения этих погрешностей зависят только от значения отношения T/T_0 . Если это отношение оказывается больше 10, то, например, при $\gamma = 0,1$, как показывают расчеты, для первых 30 гармоник погрешность δ в оценке модуля гармоник не превышает 0,3 %. Исключения составляют гармоники с номерами, подчиняющимися равенству $n\gamma = 1, 2, 3, \dots$. На рис. 3 представлено изменение погрешности (δ) в определении модуля передаточной функции апериодического звена при $T_0 = 0,1$ с, $T = 1$ с, $K = 1$ для первых тридцати гармоник.

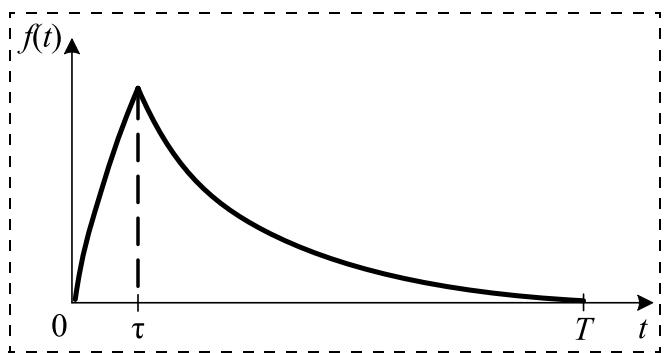


Рис. 2. Реакция апериодического звена на одиночный тестирующий импульс

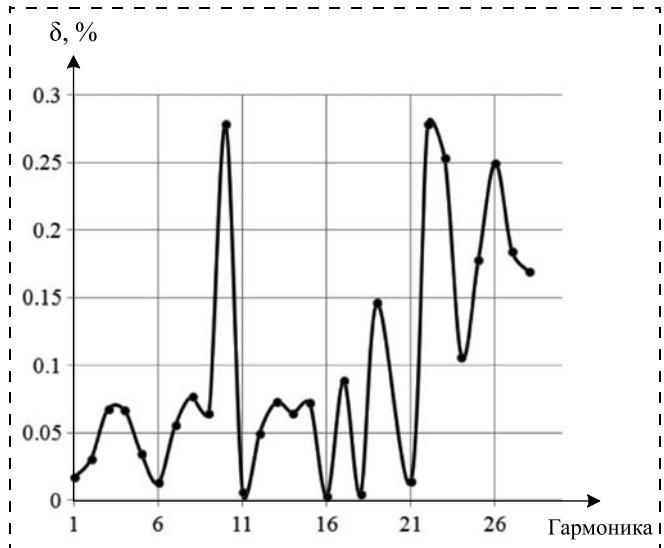


Рис. 3. Зависимость погрешности от номера гармоники

Погрешности для 20-й и 30-й гармоник на рис. 3 не показаны, так как они на два порядка превышают остальные. Погрешность для 10-й гармоники также значительно превышает погрешности для соседних гармоник. В данном примере гармоники входного сигнала X рассчитывались не по соотношению (2), а численными методами по выражениям (1), и поэтому значения гармоник входного сигнала для указанных частот оказываются отличными от нуля.

Реальное дифференцирующее звено

Реальное дифференцирующее звено описывается уравнением

$$T_0 \frac{dy}{dt} + y = K \frac{dx}{dt},$$

где x — входной сигнал, y — выходной сигнал, T_0 и K — соответственно постоянная времени и коэффициент передачи звена. АФЧХ такого звена определяется амплитудно- и фазочастотными характеристиками:

$$|W(j\omega)| = A(\omega) = \frac{K\omega}{\sqrt{1 + (\omega T_0)^2}}; \\ \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctg(\omega T_0). \quad (8)$$

Анализируя реакцию такого звена на тестирующий одиночный импульс, как это было сделано выше для апериодического звена, и далее проводя ее разложение в ряд Фурье, получаем составляющие $a_{\text{пвых}}$ и $b_{\text{пвых}}$, подобные тем, которые были получены для реакции на выходе апериодического звена:

$$a_{\text{пвых}} = \frac{XK}{\pi T_0} \frac{1}{1 + \alpha^2} (1 - \cos x_1 - \alpha \sin x_1 + k e^{-\alpha x_2}); \quad (9)$$

$$b_{\text{пвых}} = \frac{XK}{\pi T_0} \frac{1}{1 + \alpha^2} (\sin x_1 - \alpha \cos x_1 + \alpha + k e^{-\alpha x_2}). \quad (10)$$

Интересно, что выражения (9) и (10) при $T \rightarrow \infty$ также позволяют точно оценить АФЧХ реального дифференцирующего звена, а при конечных значениях T погрешность определяют точно такие же слагаемые, зависящие от x_2 , что и в выражениях (5) и (6). Таким образом, все результаты, полученные выше для апериодического звена, оказываются справедливыми и для реального дифференцирующего звена.

▲ Оценка точек АФЧХ линейного объекта

Поскольку линейный объект с действительными и отрицательными корнями характеристического уравнения может быть представлен в виде параллельного соединения апериодических и реальных дифференцирующих звеньев, то его реакция на одиночный тестирующий импульс содержит алгебраическую сумму реакций каждого звена структуры. При этом погрешности, вносимые в оценку точек АФЧХ, возрастают. Однако эти по-

грешности в итоге целиком определяются степенью затухания переходного процесса на выходе объекта после снятия тестирующего импульса в конце интервала наблюдения, ограниченного выбранным временем T .

Наличие транспортного запаздывания в структуре объекта несложно учесть при оценке положений точек АФЧХ с помощью соотношений (1).

▲ Выбор параметров одиночного тестирующего импульса и интервала наблюдения

Основными параметрами одиночного тестирующего импульса являются его амплитуда X и длительность τ . Кроме этих двух параметров необходимо также задаться значением интервала наблюдения T . Указанные параметры необходимо "увязывать" с предварительной (грубой) оценкой длительности переходного процесса на выходе объекта от действия скачка или импульса на входе, а также с уровнем аддитивного шума (СКО) на выходе. Эти два параметра позволяют оценить минимальное время наблюдения. Амплитуда импульса и его длительность выбирают так, чтобы все процессы оставались в линейной зоне статической характеристики объекта.

Таким образом, выбор гармоник с определенными номерами из разложения в ряд Фурье реакции инерционного объекта на тестирующий импульс позволяет оценить изменение положений контрольных точек АФЧХ объекта в процессе его эксплуатации и использовать эту информацию для подстройки параметров регулятора.

Оценка АЧХ динамического объекта при тестиировании его импульсной входной последовательностью фиксированной частоты

Эта задача рассматривается на примере обработки реакции сетчатки глаза в виде биопотенциала на действие периодических световых вспышек фиксированной частоты. При изучении природы генерации биопотенциалов и характера патологических нарушений в сетчатке проводится анализ частотного спектра ретинальных ответов — спектров РЭРГ.

В фундаментальных исследованиях физиологии зрения получены знания об источниках генерации биопотенциалов [8—11]. Это помогает объективному представлению электроретинограммы (ЭРГ) как суммы нескольких временных зависимостей и значительно повышает возможности использования показателей ЭРГ в качестве объективных признаков изменений, развивающихся в сетчатке. На рис. 4 представлен вид ЭРГ и ее четырех составляющих компонент при ступенчатом включении света [12].

Процессы, показанные на рис. 4, являются переходными процессами динамического объекта инерционного типа с присутствием отрицательной дифференцирующей составляющей. Эти свойства сетчатки, в той или иной степени, наблюдаются и в регистрируемых ритмических ЭРГ. Современная

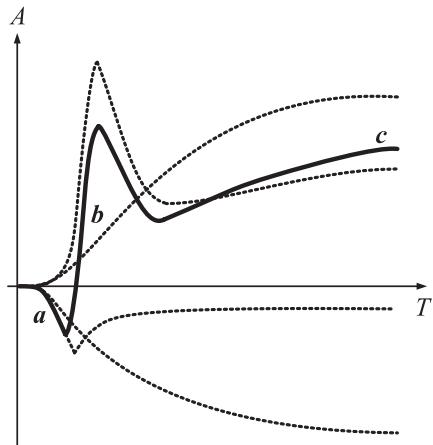


Рис. 4. Вид общей ЭРГ и ее четырех компонент

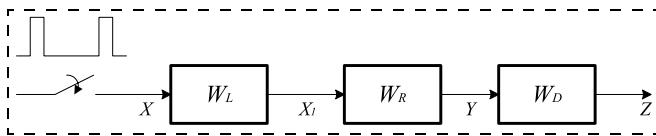


Рис. 5. Трансформация входного тестирующего воздействия $X(t)$ в РЭРГ (регистрируемый выходной сигнал $Z(t)$)

аппаратура для регистрации ЭРГ использует в качестве стимулирующего воздействия короткие световые импульсы (вспышки) длительностью 0,005 с и фильтрует появляющуюся постоянную составляющую в РЭРГ. Частоты подачи вспышек стандартные: 8,3 Гц, 10 Гц, 12 Гц, 24 Гц и 30 Гц. Рассмотрим спектр гармоник ритмических ЭРГ и оценим возможное число гармоник для построения АЧХ сетчатки как динамического объекта. Проведем далее пробный сравнительный анализ АЧХ сетчатки для двух разных видов известных состояний объекта.

Процесс трансформации входного тестирующего сигнала в РЭРГ можно представить функциональной схемой, показанной на рис. 5.

Входной тестирующий сигнал X , по существу, отражает работу коммутатора, включающего и выключающего лампу-вспышку. Лампа-вспышка, обладающая своей АЧХ (W_L), преобразует входной сигнал X в изменение светового потока X_1 . Далее сетчатка глаза со своей АЧХ (W_R) преобразует световой поток в биопотенциал Y , который соответствующим прибором со своей АЧХ (W_D) регистрируется в виде РЭРГ (Z).

Таким образом, спектр регистрируемого сигнала РЭРГ $Z(f)$ представляет собой преобразованный тремя динамическими звеньями (лампа-вспышка, сетчатка и регистрирующий прибор) спектр входного сигнала $X(f)$.

Такой процесс может быть отражен следующим соотношением:

$$Z(f) = X(f) \frac{X_1(f)}{X(f)} \frac{Y(f)}{X_1(f)} \frac{Z(f)}{Y(f)} = \\ = X(f) W_L(f) W_R(f) W_D(f), \quad (11)$$

где каждое динамическое звено представляется преобразователем спектра (или его АЧХ) в виде

$$W_L(f) = \frac{X_1(f)}{X(f)}, \quad W_R(f) = \frac{Y(f)}{X_1(f)}, \quad W_D(f) = \frac{Z(f)}{Y(f)}.$$

Аналогом такого преобразователя для линейных динамических звеньев является модуль передаточной функции, который усиливает или ослабляет амплитуду каждого конкретного гармонического входного сигнала определенной частоты или амплитуду какой-либо конкретной гармоники в разложении входного сигнала.

Консультации с разработчиками аппаратуры, позволяющей регистрировать РЭРГ (Roland Consult и Tomey), а также обработка результатов экспериментов показывают, что АЧХ лампы-вспышки при исследованиях сетчатки можно представить как некоторый фиксированный коэффициент передачи K_L для всего интересующего исследователей диапазона частот. Таким образом, лампу-вспышку считаем пропорциональным звеном, и ее влияние может быть учтено в виде поправки амплитуды X входного тестирующего сигнала.

На входе регистрирующего прибора стоит фильтр высоких частот. Нижняя частота пропускания фильтра примерно соответствует $f_0 = 5 \dots 6$ Гц. Начиная с этой частоты, на всех интересующих исследователя частотах прибор имеет равномерную полосу пропускания с коэффициентом передачи, равным K_D , который также может быть учтен как поправка амплитуды входного сигнала X .

Вид входного тестирующего сигнала показан на рис. 1. Спектр его имеет вид (2). Длительность импульса такова, что в его спектре, в соответствии с выражением (2), отсутствуют гармоники с частотами, кратными 200 Гц. Обработка регистрируемых РЭРГ показывает, что учет собственных шумов регистрирующей аппаратуры ограничивает информативную часть спектра выходного сигнала частотой, равной примерно 120 Гц. Все гармоники более высоких частот фактически представляют спектр шумовой составляющей.

Отметим, что такое ограничение на верхнюю частоту анализируемого спектра приводит к весьма ограниченному числу информативных гармоник в анализируемых сигналах. Так, при подаче световых вспышек с частотой 30 Гц таких гармоник всего 4. Кроме этого, частоты гармоник в спектрах для разных частот входных вспышек разные, что затрудняет их сравнение, отсутствуют гармоники более низких частот. Промежуточные точки АЧХ сетчатки можно получить путем искусственного увеличения периода следования импульсов нулевыми значениями выходного сигнала.

Искусственное удлинение периода разложения наблюдаемого сигнала (или "окна") нулевыми значениями применяется в радиотехнике для определения промежуточных гармоник спектра исследуемого сигнала [13–18]. В этих работах проводится

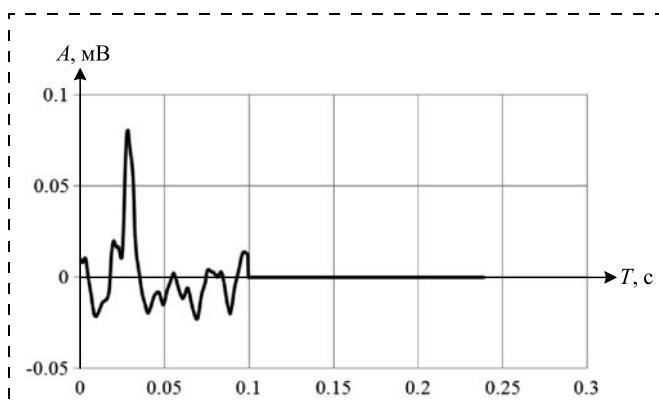


Рис. 6. Удлинение периода обработки сигнала РЭРГ (сигнал 10 Гц на входе) нулевыми значениями

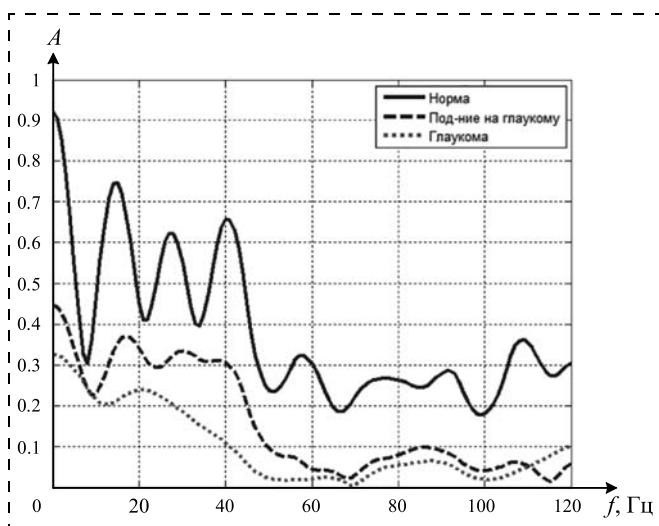


Рис. 7. АЧХ сетчаток при частоте вспышек 10 Гц: здорового субъекта (Норма), с подозрением на глаукому (Под-ние на глаукому), с глаукомой (Глаукома)

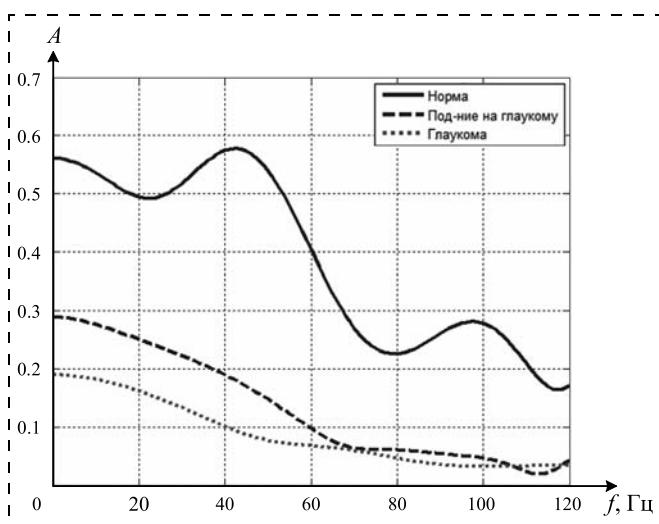


Рис. 8. АЧХ сетчаток при частоте вспышек 24 Гц: здорового субъекта (Норма), с подозрением на глаукому (Под-ние на глаукому), с глаукомой (Глаукома)

спектральный анализ непрерывного сигнала с нулевым математическим ожиданием (для РЭРГ это условие обеспечивается наличием фильтра высоких частот регистрирующего прибора) так называемым "методом окон".

Физический смысл искусственного удлинения периода наблюдаемой РЭРГ состоит в том, что при всех используемых в электроретинографии частотах подачи световых вспышек сетчатка успевает их "отработать", т. е. к приходу следующего светового импульса выходной сигнал (без учета помех) практически сходится к 0. Тогда, условно задерживая приход следующего светового импульса на определенное время и продлив на это же время нулевыми значениями выходной сигнал, мы искусственно увеличиваем период следования импульсов. При этом мы можем получить промежуточные (дополнительные) точки АЧХ сетчатки глаза. Этот прием позволяет проводить нормировку всех гармоник под один и тот же искусственный период и кроме промежуточных точек спектра дает гармоники низких частот.

На рис. 6 показано удлинение периода обработки сигнала РЭРГ (сигнал 10 Гц на входе) нулевыми значениями. При этом длительность такого периода соответствует как бы подаче на вход световых импульсов с частотой 4,15 Гц.

Анализ тестовых примеров для линейных апериодических и дифференцирующих звеньев по оценке погрешностей промежуточных точек спектров выходных сигналов и соответствующих точек АЧХ при искусственном удлинении периода приводит к необходимости восстановления постоянной составляющей в выходном сигнале. Ее наличие обеспечивает стремление к нулю переходных процессов к приходу очередного импульса и, тем самым, уменьшает погрешности в оценках промежуточных точек спектра выходного сигнала и соответствующих точек АЧХ объекта. Кроме этого, значение постоянной составляющей в выходном сигнале позволяет провести оценку коэффициента передачи объекта и проследить его изменение для разных частот входных импульсных последовательностей. Восстановление постоянной составляющей обеспечивается применением обратного цифрового фильтра при обработке оцифрованного наблюдаемого сигнала подобно тому, как это делается в работе [19].

Проведенные исследования касаются только промежуточных точек спектра наблюдаемого сигнала. Результат оценки амплитуд гармоник, вычисляемых непосредственно с использованием соотношений (1), как известно, не зависит от постоянной составляющей.

АЧХ сетчатки глаза получается делением значений амплитуд гармоник спектров $Z(f)$ на соответствующие значения амплитуд гармоник входных сигналов в соответствии с выражением (2). Подбором значения амплитуды входного сигнала (X) АЧХ сетчатки здорового субъекта целесообразно сверху ограничить условной единицей или несколько пре-

высить ее. Зная АЧХ сетчатки здорового субъекта с нормальным зрением, можно проводить сравнение АЧХ пациентов с патологией сетчатки.

На рис. 7 представлены совместные АЧХ сетчаток здорового субъекта (Норма), пациента с подозрением на глаукому (Под-ние на глаукому) и пациента с глаукомой (Глаукома). АЧХ строились по результатам обработки РЭРГ при частоте подачи световых импульсов 10 Гц, искусственном удлинении периода до 1,0 Гц и восстановленной постоянной составляющей. На рис. 8 показаны АЧХ сетчаток тех же субъектов при тех же условиях обработки, но при подаче световых импульсов с частотой 24 Гц.

Представленные АЧХ сетчаток демонстрируют нелинейные свойства подобного динамического объекта и очевидные отличия АЧХ здорового субъекта и пациентов с патологией. Наличие подобных АЧХ открывает пути получения формализованных признаков различными известными методами сглаживания экспериментальных кривых для построения диагностических систем.

Для любой из представленных АЧХ можно показать совпадение одноименных точек АЧХ сетчатки с удлинением периода и без удлинения периода. Появляющиеся дополнительные промежуточные точки уточняют вид АЧХ.

Заключение

В работе рассмотрена задача идентификации динамических объектов двумя видами импульсных тестирующих сигналов: одиночным тестирующим импульсом на фиксированном интервале наблюдения и периодической импульсной последовательностью фиксированной частоты.

Для одиночного тестирующего импульса показывается, что отношения амплитуд гармоник с одинаковыми номерами выходного и входного сигналов с определенной точностью могут свидетельствовать о координатах соответствующих точек комплексной частотной характеристики объекта. Находятся условия, накладываемые на длительность наблюдаемого переходного процесса на выходе динамического объекта при заданных параметрах тестирующего импульса, которые позволяют с необходимой точностью оценить координаты точек комплексной частотной характеристики промышленного объекта и провести адаптацию настроек регулятора.

Для периодической импульсной последовательности разложение выходного сигнала линейного динамического объекта на периоде приводит к тем же результатам, что и для одиночного импульса на фиксированном интервале наблюдения, если переходные процессы практически заканчиваются к приходу очередного импульса. Промежуточные точки частотных характеристик и точки в области

низких частот могут быть найдены, при определенных условиях, заменой наблюдаемого сигнала "нулями" на дополнительном временном отрезке. В работе показано, что из-за наличия в спектре входного сигнала гармоник с нулевыми значениями амплитуд на частотах, кратных обратной величине длительности импульса, в окрестностях этих частот соответствующие точки комплексной частотной характеристики объекта определяются с большой погрешностью. Эти точки могут быть найдены путем изменения длительности тестирующих импульсов.

Список литературы

1. Дудников Е. Г. Основы автоматического регулирования тепловых процессов. М.: ГЭИ. 1956.
2. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ. 2004.
3. Ротач В. Я. Адаптация систем управления при совместном использовании точечных и интервальных алгоритмов // Автоматизация в промышленности. 2008. № 12. С. 16–19.
4. Ротач В. Я., Кузишин В. Ф., Петров С. В. Алгоритмы и программы расчета настройки ПИ и ПИД-регуляторов по переходным характеристикам системы // Автоматизация в промышленности. 2009. № 12. С. 12–16.
5. Мазуров В. М., Литюга А. В., Синицын А. В. Развитие технологий адаптивного управления в SCADA системе TRACE MODE // Приборы и системы управления, контроль, диагностика. 2002. № 1. С. 17–22.
6. Аязян Г. К. Определение параметров модели методом площадей Симою. Уфимский государственный нефтяной технический университет. 2005.
7. Анисимов Д. Н. Идентификация линейных динамических объектов методом экспоненциальной модуляции // Вестник МЭИ. 1994. № 2. С. 68–72.
8. Falsini B., Iarossi G., Fadda A. et al., The fundamental and second harmonic of the photopic flicker electroretinogram: temporal frequency-dependent abnormalities in retinitis pigmentosa // Clin. Neurophysiol. 1999. V. 35. P. 4282–4290.
9. Zueva M., Tsapenko I., Vaskov S. The components of human and rabbit 8-Hz and 12-Hz flicker ERG as a function on intensity, size and position of stimuli // Abstracts of 42nd ISCEV Symposium (San Juan). 2004. P. 132.
10. Зуева М. В., Цапенко И. В., Пак Н. В., Васьков С. О. Источники генерации ритмической ЭРГ в сетчатке кролика // Матер. Первого междунар. междисциплинарного конгресса "Достижения нейронауки для современной медицины и психологии", 2005. С. 79.
11. Perlman I. The Electroretinogram: ERG. <http://www.webvision.ERG>.
12. Гранит Р. Электрофизиологические исследования рецепции. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 340 с.
13. Сергиненко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособ. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 768 с.
14. Применение цифровой обработки сигналов. Под ред. Э. Оппенгейма: пер. с англ. / Под ред. А. М. Рязанцева. М.: Мир. 1980.
15. Кей С. М., Марил С. Л. Современные методы спектрального анализа: Обзор // ТИИЭР. 1981. 69 (11).
16. Jenkins G. M., Watts D. G. Spectral Analysis and Its Applications. San Francisco, CA: Holden-Day, 1968.
17. Markel J. D. FTT pruning // IEEE Trans. Audio Electroacoust. Dec. 1971; AU-19: 305–311.
18. Eberhard A. An optimal discrete window for the calculation of power spectra // IEEE Trans. Inform. Theory. Mar. 1973; IT-19: 232–234.
19. Колесов О. С., Подольская И. Е., Кульмамиров С. А., Фон Чжаньлинь. Алгоритмы численного дифференцирования в задачах управления. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

Evaluation of the Frequency Properties of the Dynamic Objects Using Pulse Testing Signals

O. S. Kolosov, KolosovOS@mpei.ru, D. A. Balarev, A. D. Pronin,

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, 111250, Russian Federation,
M. V. Zueva, I. V. Tsapenko, Moscow R & D Institute of Eye Illnesses named after Gelmholz of the Federal
Agency on High-technology Medical Assistance, Moscow, 105062, Russian Federation

Corresponding author: Kolosov Oleg S., D. Sc. (Tech.), Professor,
National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, 111250, Russian Federation, e-mail: KolosovOS@mpei.ru

Received on October 25, 2016

Accepted on November 14, 2016

The topic of the article is the problem of identification of the dynamic objects by two types of the pulse testing signals: testing by a single pulse at a fixed interval of observation and testing by a periodic pulse sequence of a fixed frequency. The single testing pulse can be useful in operation of the adaptive controllers, and the testing impulse sequences are widely used, for example, for studying the nature of the biopotential changes of the eye retina (electroretinogram) in order to obtain additional features for the diagnostic systems. For a single pulse testing the authors propose to select a determined interval of observation, and this makes possible a Fourier series expansion of the observed output and input on the given interval of observation. They demonstrate that the ratio of the amplitudes of the harmonics with the same number of the output and input signals can show the corresponding point's coordinates on the a complex frequency response with a certain accuracy. This accuracy depends on the interval of the observation time and the inertial properties of an object. The advantages of this method are a good noise-immunity and little time for identification. There are some conditions imposed on the duration of the observed transient response on the output of the dynamic object with the defined parameters of the testing pulse, which allows us to evaluate the coordinates of the points of the complex frequency response of an object and to make an adaptation of the controller's settings. The result of the Fourier series expansion of the output signal for the periodic impulse sequence is the same as for a single pulse at a fixed interval of observation. The intermediate points of the frequency response and the points at low frequencies can be found by replacement of the observed signal with "zeros" on the additional time interval. The input signal spectrum has harmonics with null values of the amplitudes at the frequencies multiple to the reciprocal value of the pulse width. And the authors demonstrate that the points of the complex frequency response at these frequencies are determined with big errors. Those points can be determined by varying the testing pulse duration.

Keywords: identification, frequency properties, dynamic object, pulse testing signals, single testing pulse, periodic pulse sequence, amplitude frequency response

Acknowledgement: This article was prepared with the financial support of RFBR, project number 16-01-00086.

For citation:

Kolosov O. S., Balarev D. A., Pronin A. D., Zueva M. V., Tsapenko I. V. Evaluation of the Frequency Properties of the Dynamic Objects Using Pulse Testing Signals, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 219–226.

DOI: 10.17587/mau.18.219-226

References

1. Dudnikov E. G. *Osnovy avtomaticheskogo regulirovaniya teplovykh processov* (Fundamentals of automatic control of thermal processes), Moscow, GJEI, 1956 (in Russian).
2. Rotach V. Ja. *Teoriya avtomaticheskogo upravlenija* (The theory of automatic control), Moscow, Izdatel'stvo MJeI, 2004 (in Russian).
3. Rotach V. Ja. *Adaptatsiya sistem upravlenija pri sovmestnom ispol'zovanii tochechnykh i interval'nykh algoritmov* (Adaptation of control systems for sharing point and interval algorithms), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2008, no. 12, pp. 16–19 (in Russian).
4. Rotach V. Ja., Kuzishhin V. F., Petrov S. V. *Algoritmy i programmy rascheta nastrojki PI i PID-regulyatorov po perehodnym harakteristikam sistemy* (Algorithms and software for calculating setting of PI and PID controllers on the transitional characteristics of the system), *Avtomatizacija v Promyshlennosti*, 2009, no. 12, pp. 12–16 (in Russian).
5. Mazurov V. M., Litjuga A. V., Sincyn A. V. *Razvitiye tekhnologij adaptivnogo upravlenija v SCADA sisteme TRACE MODE* (Development of adaptive control technology in the SCADA system "TRACE MODE"), *Pribory i Sistemy Upravlenija, Kontrol', Diagnostika*, 2002, no. 1, pp. 17–22 (in Russian).
6. Ajazjan G. K. *Opryadelenie parametrov modeli metodom ploshchadej Simoju* (Determination of the model parameters by the areas method of Simoju), Publishing house of Ufimskij gosudarstvennyj neftjanoy tehnicheskij universitet, 2005 (in Russian).
7. Anisimov D. N. *Identifikacija linejnykh dinamicheskikh ob'ektorov metodom eksponential'noj moduljaci* (Identification of linear dynamic objects by the exponential modulation method), *Vestnik MJeI*, 1994, no. 2, pp. 68–72 (in Russian).
8. Falsini B., Iarossi G., Fadda A. et al., The fundamental and second harmonic of the photopic flicker electroretinogram: temporal frequency-dependent abnormalities in retinitis pigmentosa, *Clin. Neurophysiol.*, 1999, vol. 35, pp. 4282–4290.
9. Zueva M., Tsapenko I., Vaskov S. The components of human and rabbit 8-Hz and 12-Hz flicker ERG as a function on intensity, size and position of stimuli, *Abstracts of 42nd ISCEV Symposium (San Juan)*, 2004, p. 132.
10. Zueva M. V., Tsapenko I. V., Pak N. V., Vas'kov S. O. *Istochniki generacii ritmicheskij JeRG v setchatek krolika* (Sources of generating rhythmic electroretinogram in the rabbit's retina), *Materialy Pervogo Mezhdunarodnogo Mezhdisciplinarnogo Kongressa "Dostizhenija nejronauki dlya sovremennoj mediciny i psichologii"*, 2005, p. 79 (in Russian).
11. Perlman I. The Electroretinogram: ERG, available at <http://www.webvision.ERG>.
12. Granit R. *Elektrofiziologicheskie issledovaniya recepcii* (Electrophysiological studies of reception), Moscow, Izd-vo inostr. lit., 1957. 340 p. (in Russian).
13. Sergienko A. B. *Cifrovaja obrabotka signalov: uchebnoe posobie* (Digital signal processing), SPb, BHV-Peterburg, 2013, 768 p. (in Russian).
14. Oppengeim Je., Rjazancev A. M. ed. *Primenenie cifrovoj obrabotki signalov* (Application of digital signal processing), Moscow, Mir, 1980 (in Russian).
15. Kej S. M., Marpl S. L. *Sovremennye metody spektral'nogo analiza: Obzor* (Spectral analysis — A modern perspective), TIIjeR, 1981; 69 (11) (in Russian).
16. Jenkins G. M., Watts D. G. *Spectral Analysis and Its Applications*. San Francisco, CA: Holden-Day, 1968.
17. Markel J. D. FTT pruning. *IEEE Truns. Audio Electroacoust.* Dec. 1971; AU-19: 305–311.
18. Eberhard A. An optimal discrete window for the calculation of power spectra. *IEEE Trans. Inform. Theory*. Mar. 1973; IT-19: 232–234.
19. Kolosov O. S., Podol'skaja I. E., Kul'mamirov S. A., Fon Chzhan'lin' *Algoritmy chislennogo differencirovaniya v zadachach upravlenija* (Algorithms for numerical differentiation in control problems), Moscow, Publishing house of MJeI, 2009 (in Russian).

И. В. Игумнов, аспирант, rtif555@gmail.com, **Н. Н. Куцый**, д-р техн. наук, проф., kucyinn@mail.ru, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск

Алгоритм параметрической оптимизации автоматических систем с ШИМ-элементом, имеющим в своем составе нейронную сеть

Решена задача конкретизации значений коэффициентов алгоритма обучения нейронной сети (ОНС) применительно к системам, содержащим звенья с широтно-импульсной модуляцией, имеющим в своем составе искусственную нейронную сеть. Введен составной критерий наименьшего числа итераций алгоритма ОНС. Рассмотрены наиболее распространенные варианты построения нейронной сети: сеть на основе модуляционной характеристики; полносвязная однослойная нейронная сеть; полносвязная однослойная нейронная сеть с обратными связями. Приведены результаты работы генетического алгоритма по определению коэффициентов ОНС, настраивающего автоматическую систему на достижение экстремального значения интегрального критерия качества с использованием вышесказанных вариантов нейронных сетей и пяти функций активации нейронов.

Ключевые слова: генетический алгоритм, искусственная нейронная сеть, широтно-импульсная модуляция, обучение нейронной сети, метод Нелдера—Мида, интегральный критерий

Введение

При синтезе автоматических систем регулирования (АСР) большой интерес представляет использование импульсных элементов, сформированных на основе искусственных нейронных сетей (ИНС) [1, 2], в частности системы с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). При этом возникает задача параметрической оптимизации, под которой понимается вычисление значений синаптических весов нейронной сети относительно выбранного критерия качества АСР, и которую с достаточной для практики точностью решает алгоритм обучения нейронной сети (ОНС) [3], сформированный на основе метода Нелдера—Мида. Но для него, как и для большинства подобных алгоритмов, существует проблема определения коэффициентов (отражения α , растяжения γ , сжатия β , усечения d). В целях расширения области применения сформированного алгоритма ОНС, в том числе и для АСР, в которых процессы протекают достаточно быстро, введено условие: при нахождении экстремума критерия следует стремиться к уменьшению числа итераций. Вышесказанное и определяет специфику решаемой проблемы. Разумеется, существуют рекомендованные значения указанных коэффициентов [4, 5], но в работах [4, 6] определены их возможные границы для большинства задач, а в работе [6] показан ряд задач, в которых рекомендованные значения не приводят к сходимости алгоритма. Тем самым, необходимо конкретизировать рекомендованные коэффициенты ОНС [4], что в данной статье выполняется с помощью генетического алгоритма (ГА).

Таким образом, здесь применено понятие "гибридный искусственный интеллект", который складывается из трех составляющих:

- 1) нейронные сети, которые используются для построения ШИМ-элемента;
- 2) алгоритм ОНС, предназначенный для вычисления значений синаптических весов ИНС;
- 3) ГА, который и определяет значения коэффициентов алгоритма ОНС.

В настоящей работе при конкретизации коэффициентов алгоритма ОНС предлагается использовать следующий критерий:

$$\bar{I} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^B \frac{r_{jk}}{BN} - a \sum_{k=1}^B (\hat{I}_{\bar{k}} - \bar{I}_{\bar{k}}), \quad (1)$$

где r_{jk} — число итераций алгоритма ОНС на j -м начальном симплексе при k -й функции активации нейронов; $\hat{I}_{\bar{k}}$ — минимальное значение критерия оценки качества АСР при \bar{k} -й функции активации, полученное при рекомендованных значениях параметров ОНС [3]; $\bar{I}_{\bar{k}}$ — минимальное значение критерия оценки качества АСР при \bar{k} -й функции активации, полученное в результате моделирования; B — число выбранных функций активации; N — число начальных симплексов; a — нормирующий коэффициент.

Так как этот критерий — составной, относящийся к группе векторных критериев, о методике его решения сказано ниже.

Описание автоматической системы

Структурная схема настраиваемой алгоритмом ОНС автоматической системы представлена на рис. 1.

Здесь $G_p(p)$ — оператор объекта регулирования; $u(t)$ — выход ШИМ-элемента; G_{ie} — оператор ШИМ-элемента, использующий нейронную сеть; $p = d/dt$ — оператор дифференцирования; $\lambda(t)$ — задающее воздействие; $x(t)$ — регулируемая величина; $\varepsilon(t)$ — ошибка системы.

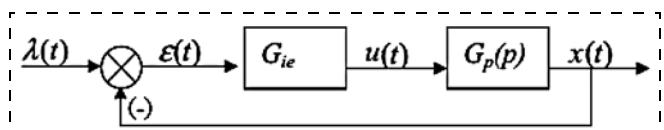


Рис. 1

Процессы, протекающие в АСР, можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned}\varepsilon(t) &= \lambda(t) - x(t); \\ u(t) &= G_{ie}\varepsilon(t); \\ x(t) &= G_p(p)u(t).\end{aligned}\quad (2)$$

Характеристика ШИМ-элемента имеет вид

$$u(t) = \begin{cases} +1, & \text{при } \varepsilon[kT] > 0 \text{ и при } kT \leq t < kT + t_k; \\ -1, & \text{при } \varepsilon[kT] < 0 \text{ и при } kT \leq t < kT + t_k; \\ 0, & \text{при } kT + t_k \leq (k+1)T; \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}t_k &= \gamma_k T; \\ k &= 1, 2, \dots,\end{aligned}\quad (4)$$

где T — период цикла работы ШИМ-элемента; t_k — длительность (ширина) k -го импульса; k — скважность k -го импульса, которая определяется с помощью ИНС [8], тем самым она работает в циклическом режиме.

В работе применяются наиболее распространенные варианты ИНС: первый из них в значительной мере совпадает с тем, что представлен в

работе [8]; во втором используется полносвязная однослойная нейронная сеть [9, 10]; в третьем применена полносвязная однослойная нейронная сеть с обратными связями [9, 10].

Первый вариант ИНС представлен на рис. 2. Этот вариант ИНС сформирован на основе модуляционной характеристики ШИМ-элемента [11, 12]:

$$\gamma_k = \sum_{j=1}^m q_j \varepsilon_i[kT]^j, \quad i = 1, 2; \quad (5)$$

$$\varepsilon_1[kT] = \varepsilon[kT] + \beta_1 \varepsilon'[kT]; \quad (6)$$

$$\varepsilon_2[kT] = \varepsilon[kT] + \beta_2 \Delta \varepsilon[kT], \quad (7)$$

где γ_k — скважность k -го импульса; $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_m)$ — вектор настраиваемых параметров; $\Delta \varepsilon[kT]$ — первая разность ошибки регулирования, вычисляемая по формуле $\Delta \varepsilon[kT] = \varepsilon[kT] - \varepsilon[(k-1)T]$; $\varepsilon'[kT]$ — значение первой производной ошибки регулирования в моменты времени kT ($k = 0, 1, \dots$); β_1, β_2 — весовые коэффициенты [11]. В данной работе $\varepsilon_i[t]$ ($i = 1, 2$) определяется с помощью нейронной сети, на входы которой поступают ошибка регулирования и либо первая производная ошибки, либо ошибка в предыдущий момент времени.

На рис. 2 нейрон Nr_1 с учетом выражения (5) имеет модульную функцию активации $\phi(s) = |s|$, где s — результат линейного сумматора нейрона [8, 13], на который поступают со входа 1 — ошибка регулирования $\varepsilon[kT]$ и со входа 2 — либо $\varepsilon'[kT]$, либо $\varepsilon[(k-1)T]$, с весовыми коэффициентами w_{11} (в случае использования производной весовой коэффициент $w_{11} = 1$, а при применении разности $w_{11} = 1 + \beta_2$) и w_{21} ($w_{21} = \beta_1$ и $w_{21} = -\beta_2$ соответственно [8]); Nr_i ($i = 2, \dots, m$) — нейроны скрытого слоя; $w_{32}, \dots, w_{3, m}, w_{4, m+1}, \dots, w_{m+2, m+1}$ — весовые коэффициенты, образующие вместе с w_{11} и w_{21} матрицу весовых коэффициентов \mathbf{W}_1 .

Второй и третий варианты (рис. 3, 4) реализации ИНС сформированы на основе теории нейронных сетей [9, 10].

На рис. 3 Nr_i — нейроны скрытого слоя ($i = 1, \dots, m$), $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1, m}, w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2, m}$ и $w_{3, m+1}, \dots, w_{m+2, m+1}$ — весовые коэффициенты, образующие матрицу весовых коэффициентов \mathbf{W}_2 .

На рис. 4 Nr_i — нейроны скрытого слоя, C_i — значение выходов нейронов на предыдущем цикле работы нейронной сети ($i = 1, \dots, m$); $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1, m}, w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2, m}, w_{31}, w_{32}, \dots, w_{3, m+1}, \dots, w_{m+3, 1}, w_{m+3, 2}, \dots, w_{m+3, m+1}$ — весовые коэффициенты, образующие матрицу весовых коэффициентов \mathbf{W}_3 .

В качестве оценки работы автоматической системы принят интегральный критерий, который в общем виде может быть записан следующим образом:

$$I(\mathbf{W}_i) = \int_0^\infty F(\varepsilon(t, \mathbf{W}_i)) dt. \quad (8)$$

Здесь $\varepsilon(t, \mathbf{W}_i)$ — ошибка системы ($i = 1, 2, 3$), F — выпуклая функция.

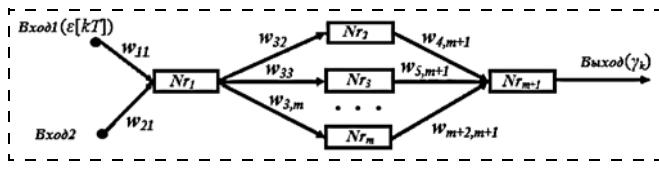


Рис. 2

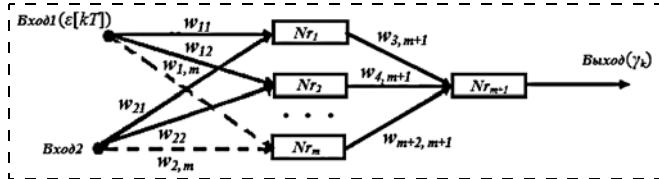


Рис. 3

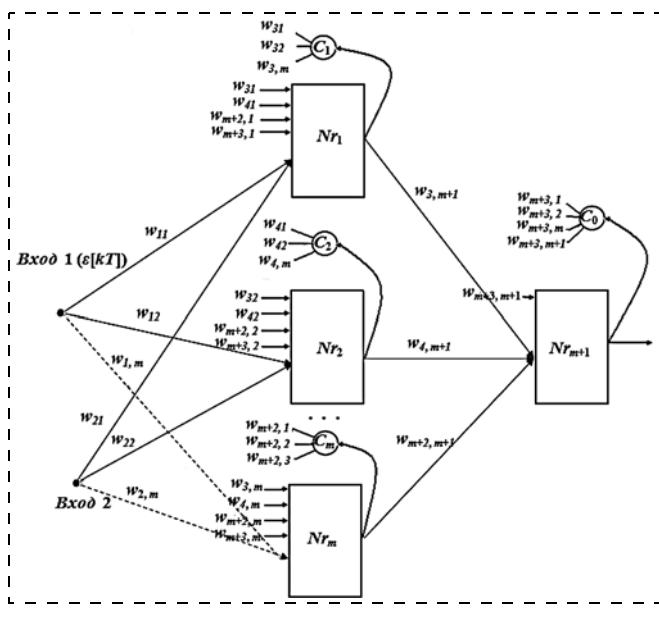


Рис. 4

Алгоритм ОНС, сформированный на основе метода Нелдера — Мида

Как говорилась ранее, для обучения ИНС разработан алгоритм ОНС [3], который построен на основе метода Нелдера — Мида. Исходя из специфики решаемой задачи представим последовательно и достаточно подробно те моменты, которые определяют его работоспособность. Для дальнейшего изложения обратимся к ИНС (см. рис. 3), которая наиболее наглядно отражает суть формирования начальных симплексов.

Во-первых, в целях обеспечения сходимости алгоритма к глобальному экстремуму формируется достаточно большой набор начальных симплексов, состоящих, как известно, из $(n + 1)$ -й точки, каждая из которых имеет n координат, где n (в нашем случае) — число весовых коэффициентов ИНС и $n = 3$. Координаты n первых точек этих симплексов назначены таким образом, чтобы выход нейронной сети отражал реакцию на значения отдельного синаптического веса [5]. Это достигается путем представления ИНС в виде ориентированного графа, где вершинами графа считаются нейроны, вход(ы) и выход(ы) ИНС. Дальше для каждой точки симплекса строится путь, соединяющий вершины-входы со всеми вершинами-выходами, содержащий приоритетную дугу (приоритетный вес), и оформляется набор дуг, входящих в этот путь. Если приоритетная дуга соединяет вершину-вход с вершиной-нейроном, к этому набору добавляются дуги, соединяющие эту же вершину-нейрон с другим вершинами-входами. После этого в выбранной точке симплекса все веса, входящие в этот набор дуг, приравниваются к 1, а приоритетный вес — соответственно значению ξ . В соответствии с работой [4] в $(n + 1)$ -й точке значение всех синаптических весов принимаются равными 0. Также в точках симплекса используется варьирование знака приоритетного веса ξ , и как результат предварительных исследований конкретизированы значения ξ в виде $\pm 1, \pm 10, \pm 100, \pm 1000$. Для одного из этих значений при $n = 6$ будем иметь 64 начальных симплексов (размещение с повторением двух элементов по шести позициям), а в конечном итоге — 256 начальных симплексов.

Во-вторых, указанное выше число начальных симплексов определяет соответствующий достаточно большой объем исследований. В целях его уменьшения для всех начальных симплексов предлагается выполнить следующие операции. В каждом симплексе для всех точек вычисляется значение критерия (8), которое в данном случае обозначается I_{ij} , где $i = 1, 2, \dots$ — номер симплекса, $j = 1, 2, \dots$ — точка i -го симплекса. Затем определяется \hat{I} — характеристическое число симплекса: $\hat{I} = \min(I_{ij})$. Далее рассматриваются только те симплексы, для которых $\frac{\hat{I}}{\min(\hat{I})} \leq \mu$ (где μ — произвольное натуральное число > 1).

В-третьих, с каждым из этих симплексов выполняются основные операции метода Нелдера — Мида [4]:

1. *Сортировка* — из вершин симплекса (векторов значений весовых коэффициентов z) выбираются три точки: z_h с наибольшим (из выбранных) значением критерия I , точка z_g со следующим по величине значением критерия и точка z_l с наименьшим значением критерия (h, g, l — индексы точек z_h, z_g и z_l в вершинах симплекса).

2. *Отражение* — проектирование z_h через центр тяжести в соответствии с соотношением

$$z_r = (1 + \alpha)z_c - \alpha z_h, \quad (9)$$

где α является коэффициентом отражения; z_r — точка отражения; z_c — центр тяжести, вычисляемый по формуле $z_c = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{z_i}{n+1}, i \neq h$.

3. *Растяжение* — если $I(z_r) < I(z_l)$, то направление отражения признается удачным, и делается попытка растянуть симплекс в этом направлении:

$$z_e = (1 - \gamma)z_c - \gamma z_r, \quad (10)$$

где γ представляет собой коэффициент растяжения; z_e — точка растяжения. Если $I(z_e) < I(z_l)$, то z_h заменяется на z_e , происходит проверка на критерий окончания поиска, и в случае неуспеха процедура продолжается с новой итерации с операции *Сортировка*. В противном случае z_h заменяется на z_r и также проводится проверка на критерий окончания поиска (14) и в случае неуспеха продолжается с операции *Сортировка*.

4. *Сжатие* — если $I(z_g) < I(z_r)$, то считается, что симплекс слишком велик и его необходимо сжать. Сжатие может быть внутренним и внешним.

Внешнее сжатие. Если $I(z_r) < I(z_h)$, то вычисляется

$$z_s = z_c + \beta(z_r - z_c), \quad (11)$$

где β представляет собой коэффициент сжатия; z_s — точка сжатия.

Если $I(z_s) < I(z_l)$, добавляем точку z_s в множество точек симплекса вместо z_h и заканчиваем итерацию (проверяем условие сходимости (14)), иначе проводим операцию усечения, о которой сказано ниже.

Внутреннее сжатие. Если $I(z_h) < I(z_r)$, то вычисляется

$$z_s = \beta z_h + (1 - \beta)z_c. \quad (12)$$

Затем поступаем аналогичным образом, что и при внешнем сжатии.

5. *Усечение* (редукция). Вычисляется новый симплекс:

$$z_i = z_l + \frac{z_i - z_l}{d}, i = 1, \dots, n + 1, i \neq l. \quad (13)$$

Критерий окончания поиска (условие сходимости) [4], примененный в данной работе, с учетом

конкретики решаемой задачи определяется выражением

$$\left\{ \frac{1}{n+1} \sum_{i=1}^{n+1} [I(z_i^{(\bar{k})}) - I(z_c^{(\bar{k})})]^2 \right\}^{1/2} \leq \bar{\varepsilon}, \quad (14)$$

где $\bar{\varepsilon}$ — произвольное малое число; $I(z_c^{(\bar{k})})$ — значение целевой функции в центре тяжести симплекса; $\bar{k} = (1, 2, 3, \dots)$ — номер итерации ОНС.

При выполнении критерия окончания поиска точка с наименьшим значением критерия I будет считаться решением по данному симплексу.

После обработки всех симплексов происходит сравнение их результатов и выбирается точка с наименьшим значением критерия I , и ее значения синаптических весов и считаются оптимальными.

Описание генетического алгоритма

Указанный выше ГА, определяющий параметры ОНС, построен на основе работы [15]. Согласно работе [15] каждый параметр ОНС должен быть представлен в виде хромосомы, длина которой в закодированном виде определяется следующим образом:

$$L_j = \left\lceil \log_2 \frac{S_j}{\delta_j} \right\rceil + 1; j = 1, 2, \dots, m, \quad (15)$$

где под $[r]$ понимается наименьшее целое, большее или равное r [16], но исходя из специфики задачи — большее; S_j — ограничение j -го параметра сверху; δ_j — некоторый шаг изменения j -го параметра; m — число настраиваемых параметров.

Таким образом, исходя из сути ГА структуру хромосомы можно представить с помощью схемы, изображенной на рис. 5.

После вычисления длины хромосомы для каждого параметра формируется популяция, состоящая из некоторого числа особей, каждая из которых состоит из m хромосом и представляет собой набор коэффициентов алгоритма ОНС.

Далее следуют процедуры: определение "приспособленности" для каждой особи, отбор "родителей", мутации и отбор "особей" для следующего поколения. Для определения "приспособленности" особи необходимо провести моделирование настройки алгоритмом ОНС автоматической системы с разными начальными симплексами и с теми параметрами, которые закодированы в ее хромосомах, и определить среднее число итераций. Так как в ГА важно получить особь с наибольшей "приспособленностью", а составной критерий (1) необходимо минимизировать, то "приспособленность" после

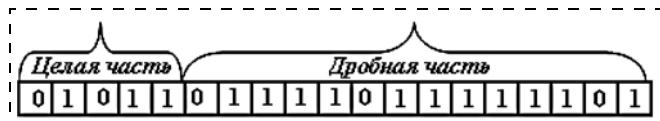


Рис. 5

операции свертки методом взвешенной суммы [17] следует искать по формуле

$$f_i = \frac{1}{N} \frac{B}{\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{B_N} r_{jk}} + a \sum_{k=1}^B (\hat{I}_k - \bar{I}_k); i = 1(1)s, \quad (16)$$

где f_i — "приспособленность" i -й особи; r_{jk} — число итераций алгоритма ОНС при j -м начальном симплексе при k -й функции активации нейронов; \hat{I}_k — минимальное значение при k -й функции активации, полученное при рекомендованных значениях коэффициентов алгоритма ОНС [3]; \bar{I}_k — минимальное вычисленное значение при k -й функции активации; B — число выбранных функций активаций; N — минимальное число начальных симплексов, обеспечивающих сходимость ГА и взятых из сгенерированного выше набора; a — коэффициент важности ($a \geq 10$); s — число особей в популяции.

В данной работе для отбора особей в новое поколение применена стратегия "элитизм" [15, 16], в которой 5 % лучших особей K -го поколения всегда переходят в следующее поколение, а остальные добираются с помощью порогового метода отбора. Окончание работы алгоритма происходит, когда все особи популяции, за исключением подвергшихся мутации, описывают с некоторой погрешностью одно и то же решение в течение 3...5 поколений.

Результаты исследования

Для иллюстрации вышеизложенного рассмотрим автоматическую систему (см. рис. 1), в которой объект регулирования G_p конкретизирован следующим образом:

$$G_p(p) = \frac{k_{\text{им}}}{p} \frac{k_{\text{об}}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-\tau p}, \quad (17)$$

где $k_{\text{об}}$ — коэффициент передачи объекта; $k_{\text{им}}$ — коэффициент передачи исполнительного механизма; T_1, T_2 — постоянные времени объекта; τ — время запаздывания.

Исследования проведены в достаточно большом диапазоне параметров объекта:

$$0,001 \leq k_{\text{им}} \leq 0,1; 1 \leq \frac{\tau}{T_{\text{об}}} \leq 1,25,$$

где $T_{\text{об}} = \max[T_1, T_2]$.

Ограниченный объем статьи заставляет представить лишь те результаты, которые в большей мере отражают проведенные исследования. Исходя из сказанного приведены результаты исследования при $k_{\text{им}} = 0,01$; $k_{\text{об}} = 1$; $T_1 = 10$; $T_2 = 40$; $\tau = 50$ и при цикле $T = 25$, задающем воздействии $\lambda(t) = 0,5 \cdot 1(t)$ и ограничениях, при которых значение скважности γ_k , полученное с помощью нейронной сети, лежит в пределах $[0; 1]$. Исходя из анализа литературы [9, 10, 18] выбраны следующие функции активации для нейронов скрытого слоя: логистиче-

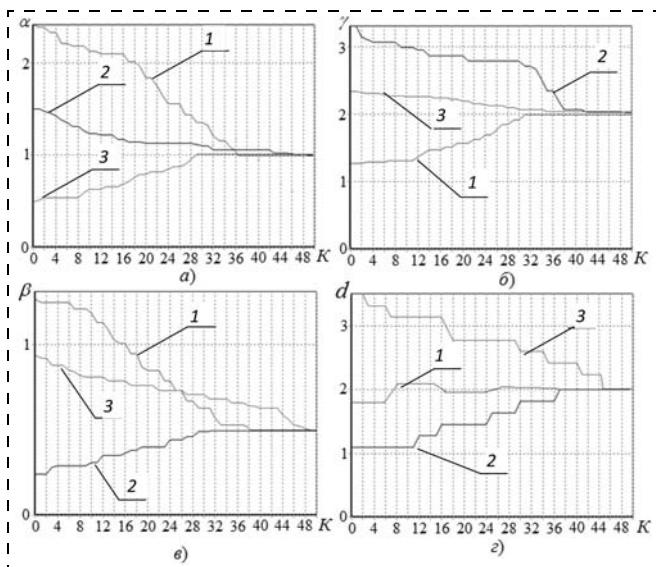


Рис. 6

ская, степенная, гиперболический тангенс, сигмоидальная (рациональная), синусоидальная. В настоящей работе исследования проведены для нейронных сетей, в которых алгоритм ОНС определяет значения для 3...25 весовых коэффициентов.

Параметры для определения длины хромосомы конкретизированы в следующем виде: верхняя граница каждого из настраиваемых параметров с учетом границ, указанных в работе [6], равна $S_j = 5$, а шаг изменения $\delta_j = 0,001$. Тогда длина L_j каждой из хромосом равна

$$L_j = \left\lceil \log_2 \frac{5}{0,001} \right\rceil + 1 = \lceil 12,28 \rceil + 1 = 14.$$

Параметры ГА исходя из результатов предварительных исследований примем следующими:

- вероятность скрещивания — 85 %;
- вероятность мутации — 20 %;
- число особей в популяции — 50.

На рис. 6 приведены зависимости параметров алгоритма ОНС α , β , γ , d от числа поколений K .

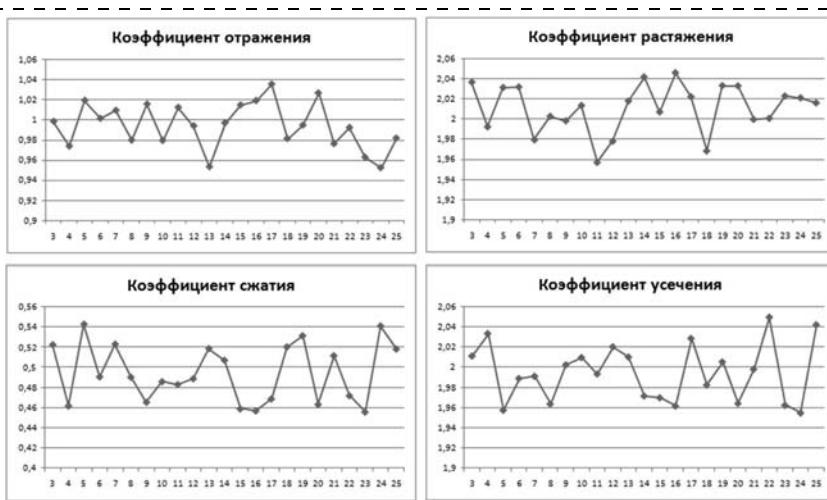


Рис. 7

Под цифрами 1, 2, 3 представлены зависимости, отражающие поведение ГА с разных начальных популяций.

Исходя из того, что при $K > 45$ (рис. 6, a) значения кривых 1, 2, 3 совпадают с достаточной для практики точностью, аналогично и для β , γ и d , можно говорить о сходимости ГА.

Для представленных выше нейронных сетей (см. рис. 3, 4) при определении α , β , γ и d поступаем аналогично.

На рис. 7 показаны зависимости параметров алгоритма ОНС от числа весовых коэффициентов только для третьего варианта реализации ИНС как наиболее сложного (см. рис. 4). Здесь по оси абсцисс отложены число весовых коэффициентов, а по оси ординат — соответствующие значения параметров.

Анализ результатов, представленных на рис. 7, на которых среднеквадратическое отклонение лежит в допустимых практикой пределах (0,05), говорит, что число весовых коэффициентов практически не влияет на значение параметров алгоритма ОНС.

Таким образом, проведенные эксперименты позволяют рекомендовать параметры алгоритма ОНС при настройке ШИМ-элемента, сформированного на основе ИНС: коэффициент отражения $\alpha = 1$, коэффициент сжатия $\beta = 0,5$, коэффициент растяжения $\gamma = 2$, коэффициент усечения $d = 2$.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что вышеизложенный метод можно применять при определении коэффициентов алгоритмов, сформированных на основе метода Нелдера — Мида.

Список литературы

1. Yuan Z. A. Neural Network Based Space-Vector PWM Controller for Motor Drive // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 816–817. P. 1002–1005.
2. Joao O. P., Bose B. K., Da Silva L. E. B. A neural-network-based space-vector PWM controller for voltage-fed inverter induction motor drive // IEEE Transactions on Industry Applications. 2000. Vol. 36. P. 1628–1636.
3. Игумнов И. В., Куцый Н. Н. Нейросетевая реализация и настройка ШИМ-элементов в автоматических системах // Вестник НГТУ. 2015. № 3 (60). С. 23–32.
4. Химмельбау Д. Прикладное нелинейное программирование. М.: Мир, 1975. 536 с.
5. Ловецкий К. П., Севастьянов Л. А., Бикеев О. Н. Математический синтез оптическихnanoструктур. М.: Изд. РУДН, 2008. 143 с.
6. Paviani D., Ph. D. Dissertation, The Univ. of Texas, Austin, Tex., 1969.
7. Вороновский Г. К., Махотило К. В., Петрашев С. Н. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Харьков: Основа, 2004. 112 с.
8. Игумнов И. В., Куцый Н. Н. Формирование ШИМ-элемента с использованием искусственных нейронных сетей // Вестник ИрГТУ. 2014. № 6 (89). С. 31–35.
9. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю. Нейросетевые системы управления. М.: ИПРЖР, 2002. 480 с.
10. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 496 с.
11. Куцый Н. Н. Автоматическая параметрическая оптимизация дискретных систем регулирования: Дис. ... докт. техн. наук: 05.13.06: защищена 26.11.97.

12. Слепов Н. Н., Дроздов Б. В. Широтно-импульсная модуляция (Анализ и применение в магнит. записи). М.: Энергия, 1978. 191 с.

13. Локтюхин В. Н., Челебаев С. В., Антоненко А. В. Нейросетевые аналого-цифровые преобразователи. М.: Горячая линия—Телеком, 2010. 128 с.

14. Игумнов И. В., Кучий Н. Н. Применение метода Нелдера—Мида при настройке нейронных сетей, реализующий ПИД-закон регулирования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 90—94.

15. Кучий Н. Н., Лукьянов Н. Д. Параметрическая оптимизация АИМ-систем с помощью генетического алгоритма // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 5. С. 10—13.

16. Грехем Р., Кнут Д., Птешник О. Конкретная математика. Основание информатики: Пер. с англ. М.: Мир, 1998. 703 с.

17. Подиновский В. В. Введение в теорию важности критерии в многокритериальных задачах принятия решений: учеб. пособ. М.: Физматлит, 2007. 66 с.

18. Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. М.: Горячая линия — Телеком, 2001. 369 с.

The Algorithm of Parametric Optimization of Automated Systems with PWM Element that Incorporates Artificial Neural Network

I. V. Igumnov, rtif555@gmail.com, N. N. Kucyj, kucyinn@mail.ru✉, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074, Russian Federation

Corresponding author: Kucyj Nikolay N., D. Sc. Ph. D. (Tech.), Professor of Automated Systems, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, 664074, Russian Federation, e-mail: kucyinn@mail.ru

Received on October 08, 2016
Accepted on October 21, 2016

Most optimization algorithms require prior appointment of its parameters. Formed on the basis of the method Nelder—Mead for the neural network learning algorithm (NNLA) was no exception. In this article the task specification values of the coefficients of the neural network learning algorithm (NNLA) is solved for systems containing PWM element that is composed of an artificial neural network. For this the genetic algorithm is applied to the most appropriate in this case selection strategy — "elitism". In order to expand the scope of formed algorithm NNLNA, including automatic control systems in that processes are quickly introduced integral criterion, that along with the most common criterion, having in its composition an error, use the least amount of NNLNA algorithm iterations. Assessment "health" formula is shown after the convolution operation of such criteria. The main variants of the neural network are considered: based on the modulation characteristics; single-layer fully connected neural network; single-layer fully connected neural network with feedback. The results of the application of genetic algorithm are given for determining the coefficients of the NNLNA that configures an automatic system to achieve the integral quality criteria minimum, with use of the aforementioned embodiments of neural networks and features five activation of the neuron network.

Keywords: genetic algorithm, artificial neural network, pulse width modulation, the training of the neural network, a method Nelder—Mead, integral criterion

For citation:

Igumnov I. V., Kucyj N. N. The algorithm of parametric optimization of automated systems with PWM element that incorporates artificial neural network, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 227—232.

DOI: 10.17587/mau.18.227-232.

References

1. Yuan Z. A. Neural Network Based Space-Vector PWM Controller for Motor Drive, *Advanced Materials Research*, v. 816—817, 2013, pp. 1002—1005.
2. Joao O. P., Bose B. K., Da Silva L. E. B. A neural-network-based space-vector PWM controller for voltage-fed inverter induction motor drive/ B. K. Bose, L. E.B. Da Silva, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2000, v. 36, pp. 1628—1636.
3. Igumnov I. V., Kucyj N. N. *Nejrosetevaja realizacija i nastrojka SHIM-jelementov v avtomaticheskikh sistemah* (Neural network implementation and configuration PWM elements in automatic systems), *Vestnik NGTU*, 2015, no. 3 (60), pp. 23—32 (in Russian).
4. Himmelblau D. *Prikladnoe nelinejnoe programmirovaniye* (Applied Nonlinear Programming), Moscow, Mir, 1975, 536 p. (in Russian).
5. Loveckij K. P., Sevast'janov L. A., Bikeev O. N. *Matematicheskij sintez opticheskikh nanostruktur* (Mathematical synthesis of optical nanostructures), Moscow, Publishing house of RUDN, 2008, 143 p. (in Russian).
6. Paviani D., Ph. D. Dissertation, The Univ. of Texas, Austin, Tex., 1969.
7. Voronovskij G. K., Mahotilo K. V., Petrashev S. N. *Geneticheskie algoritmy, iskusstvennye nejronnye seti i problemy virtual'noj real'nosti* (Genetic algorithms, artificial neural networks, and virtual reality problems), Har'kov, Osnova, 2004, 112 p. (in Russian).
8. Igumnov I. V., Kucyj N. N. *Formirovaniye SHIM-jelementa s ispol'zovaniem iskusstvennykh nejronnykh setej* (Forming PWM element using artificial neural networks), *Vestnik IrGTU*, 2014, no. 6 (89), pp. 31—35 (in Russian).
9. Terehov V. A., Efimov D. V., Tjukin I. Ju. *Nejrosetevye sistemy upravlenija* (Neural network management system), Moscow, IPRZhR, 2002, 480 p. (in Russian).
10. Galushkin A. I. *Nejronnye seti: osnovy teorii* (Neural networks: basic theory), Moscow, Gorjachaja li-nija—Telekom, 2010, 496 p. (in Russian).
11. Kucyj N. N. *Avtomaticheskaja parametricheskaja optimizacija dis-kretnyh sistem regulirovaniya* (Automatic parameter optimization disspecific control systems): Dis. ... dokt. tehn. nauk: 05.13.06: zashishhena 26.11.97 (in Russian).
12. Slepov N. N., Drozdov B. V. *Shirotno-impul'snaja moduljacija (Analiz i primenie v magnit. zapisji)* (Pulse Width Modulation (analysis and application in the magnet. Record)), Moscow, Jenergija, 1978, 191 p. (in Russian).
13. Loktjuhin V. N., Chelebaev S. V., Antonenko A. V. *Nejrosetevye analogo-cifrovye preobrazovateli* (Neural analog-to-digital converters: Under the general), Moscow, Gorjachaja linija — Telekom, 2010, 128 p. (in Russian).
14. Igumnov I. V., Kucyj N. N. *Primenenie metoda Neldera-Mida pri nastrojke nejronnyh setej, realizujushhij PID-zakon regulirovaniya* (Application of Nelder-Mead when configuring the neural network that implements the PID control), *Sovremennye tehnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovaniye*, 2016, no. 1 (49), pp. 90—94.
15. Kucyj N. N., Luk'janov N. D. *Parametricheskaja optimizacija AIM-sistem s po-moshchju geneticheskogo algoritma* (Parametric optimization of PAM systems in the power of a genetic algorithm), *Mekhatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 5, pp. 10—13 (in Russian).
16. Grjehem R., Knut D., Ptashnik O. *Konkretnaja matematika. Osnovaniye informatiki* (Concrete Mathematics. Basis-of informatics), Moscow, Mir, 1998, 703 p.
17. Podinovskiy V. V. *Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev v mnogokriterialnyh zadachah priyatiya reshenij* (Introduction to the theory of the importance of criteria in a lot of criteria decision-making problems), Moscow, Fizmat-lit, 2007. 66 p. (in Russian).
18. Kruglov V. V., Borisov V. V. *Iskusstvennye nejronnye seti* (Artificial Neural Networks), Moscow, Gorjachaja linija — Telekom, 2001, 369 pp. (in Russian).

И. Н. Дащевский, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., dash@ipmnet.ru,

М. М. Князьков, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ipm_labrobotics@mail.ru,

А. Н. Суханов, мл. науч. сотр., sukhanov-artyom@yandex.ru,

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН

Разработка алгоритмов управления полуавтоматическим ортезом¹

Рассматривается развитие научных основ создания и управления полуавтоматическими ортезами конечностей человека для реабилитации двигательных функций, нарушенных из-за травм и иных заболеваний. Обсуждается возможное использование сенсоров усилия для регулировки уровня нагрузки на стопу пациента и формирование на базе информации от сенсоров, характеризующих состояние пациента, данных по коэффициенту разгрузки ортезированной конечности в широком диапазоне окружного натяга. Выбрана и разработана платформа для системы управления, основанная на модульной архитектуре с возможностью модернизации.

Ключевые слова: биомеханика, разгрузка, механика деформируемого тела, моделирование, активные ортезы

Введение

Переломы трубчатых костей относятся к типовым травмам в практике хирурга-травматолога. Традиционное средство, используемое при их лечении — гипсовые повязки, накладываемые на сроки до 10...12 недель [1]. Столь длительные сроки обездвижения имеют следствием заметное ослабление и атрофию костно-мышечного аппарата и удлинение сроков реабилитации [2, 3].

Появившиеся за последние 30 лет новые материалы позволили постепенно вытеснить гипсовые повязки и шины ортопедическими конструкциями нового типа — высокотехнологичными ортезами. Эти устройства имеют возможность гибкой настройки под конкретного пациента в течение всего периода лечения, что позволяет обеспечить лучшую фиксацию и разгрузку, уменьшить сроки и улучшить качество лечения. По этой причине они более актуальны в лечении переломов и их осложнений, для коррекции и профилактики развития ортопедических дефектов, для восстановления утраченных форм и функций опорно-двигательной системы.

Ортезы (греч. *orthos* — прямой, правильный) — технические средства, применяемые в медицине, спорте и быту и предназначенные для профилактики и лечения повреждений, ортопедических заболеваний и дефектов, а также восстановления утраченных форм и функций опорно-двигательного аппарата. Термин "ортез" может означать различные приспособления: наколенники, стельки, корсеты, туторы и т.д. [4]. Главные функции ортезов: фиксация, разгрузка, коррекция и ак-

тивизация функций поврежденной конечности. На конечностях используют такие типы ортезов, как тутор (фиксирующее ортопедическое устройство, состоящее из гильз, соединенных шинами без шарниров, рис. 1), лонгета (полуоткрытый тутор), ортопедический аппарат (тутор с суставными шарнирами), специальная обувь и др.

Полная нагрузка конечности до наступления коксилляции может привести к осложнениям и повторным повреждениям проблемного участка [5, 6], и в то же время недостаточная нагрузка ведет к дегенерации костно-мышечной системы и увеличению времени восстановления [2, 3]. Поэтому для эффективного использования ортеза необходимо создавать уровень разгрузки, при котором, с одной стороны, снижена опасность повторных повреждений, а с другой, обеспечена возможность проведения динамической коррекции поврежденного сегмента в функционально-правильном положении, что способствует восстановлению локомоторной функции конечности и ранней реабилитации в максимально комфортных условиях при различной локализации и характере повреждения [11, 12]. Это определяет важность и актуальность проблемы изучения возможностей управления разгрузкой [13].



Рис. 1. Туторы на бедро, голень и на всю ногу

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-01266 А



Рис. 2. Жесткие ортезы как элементы медицинских экзоскелетов

В работах [14, 15] была высказана гипотеза о возможности эффективного управления уровнем разгрузки пораженной зоны путем варьирования степени воздействия ортеза на пораженную область (управление боковой компрессией). В настоящее время настройку ортезов проводят исходя из эмпирических данных. В процессе лечения по мере образования зазора между конечностью и ортезом устройство периодически фиксируется лечащим врачом или пациентом. В связи с этим авторами статьи предлагается разработка следящей системы мониторинга степени разгрузки и связанной с ней системы подстройки уровня разгрузки пораженной области. Данная система будет реализована в виде полуавтоматической системы управления коэффициентом разгрузки ортезированной конечности. Жесткие ортезы могут рассматриваться как элементы внешнего скелета (экзоскелета) конечности или позвоночника, конструктивно повторяя их анатомию и биомеханику (рис. 2).

В мировой научной литературе стремительно растет число публикаций, посвященных технологиям реабилитации человека с использованием экзоскелетных устройств (активных ортезов). Это свидетельствует о чрезвычайной актуальности этой медицинской проблемы и возможности ее инженерного обеспечения на основе современных достижений робототехники, мехатроники и информационных технологий [16].

1. Методы и средства реабилитации двигательных функций человека

Производственные и бытовые травмы негативно сказываются на работоспособности человека, а также снижают его мобильность. Существующие методики реабилитации пациентов после травм (растяжений, переломов) основываются на иммобилизации поврежденного участка тела с помощью наложения шин или гипса после соответствующей медицинской помощи. Данная практика предполагает длительное восстановление и снижение работоспособности и мобильности человека. Применение ортезов, экзоскелетных устройств, позволяющих

снизить нагрузку на поврежденную конечность с сохранением мобильности и стабилизацией суставов, становится актуальным направлением в практике посттравматической реабилитации. Автоматизация данных устройств дает большое преимущество перед неуправляемыми системами, позволяющими только фиксировать положение конечности по желанию пациента или предписанию врача [17]. При этом задачей, стоящей перед разработчиком автоматизированного ортопедического устройства, является создание мехатронной управляемой системы, снабженной исполнительным устройством, выполняющим предписанную ему функцию, и сенсорной системы, позволяющей оценить взаимодействие человека и ортопедического устройства в любой момент времени для своевременного выполнения команд управления.

В данной работе предлагается концептуальная схема автоматизированного голеностопного ортеза с активным модулем фиксации на ноге пациента, управляемым микрокомпьютером на основе информации о фазе движения пациента, получаемой системой сенсоров, интегрированных в конструкцию голеностопного ортеза. Разрабатываемый модуль позволит фиксировать ортез на ноге пациента с необходимой податливостью, а также будет поддерживать этот уровень фиксации в процессе воздействия динамических нагрузок на поврежденную конечность [18].

Для управления уровнем разгрузки ортезированной конечности как интегральной характеристикой можно использовать систему, реализованную на базе простых в реализации алгоритмов. Поэтому актуальной задачей является разработка и техническая реализация упрощенной мобильной системы измерения степени разгрузки конечности в ортезе и полуавтоматической системы управления боковой компрессией ортеза по сигналам от сенсоров усилия для регулировки уровня разгрузки. Перспективами дальнейшей работы в этом направлении могут стать исследования возможностей полуавтоматического управления процессом реабилитации пациентов с нарушениями двигательных функций конечностей с помощью активных ортезов (экзоскелетов) конечности.

Рассматриваемые ортезы должны быть оснащены набором датчиков, иметь алгоритмы интеллектуального поведения и программное обеспечение, которые позволяют адаптировать работу такой системы к фактическому состоянию пациента и ходу процесса реабилитации.

В качестве датчиков можно использовать сенсоры усилия для регулировки уровня нагрузки на стопу пациента. При этом на базе информации от сенсоров, характеризующих состояние пациента, формируются данные по коэффициенту разгрузки

ортезированной конечности в широком диапазоне окружного натяга.

В работе рассмотрена платформа для системы управления, основанная на модульной архитектуре с возможностью модернизации.

2. Алгоритм принятия решений в ручном и автоматическом режиме управления ортезом

Ядром предлагаемой системы (рис. 3) выступает микроконтроллер с программным обеспечением, позволяющим вести диалог с пользователем посредством системы человека-машинного интерфейса. Данный диалог подразумевает принятие команд от пациента для ослабления или усиления фиксации ортезного устройства на ноге. Исполнительное устройство, представленное электродвигателем, будет выполнять команды микроконтроллера на совершение необходимого действия. Приводная система фиксации может быть как механической, так и пневматической, что расширяет область применения устройства в зависимости от вида травмы. Система тензорезисторов, являющихся сенсорными элементами, интегрирована в конструкцию голеностопного ортеза. Данная система осуществляет мониторинг силовых нагрузок на поврежденную конечность. При отклонении показаний датчиков от референсных значений следящая система электропривода получает сигнал на выполнение необходимой инструкции от контроллера.

Выявление фазы движения ноги пациента происходит по динамике показаний датчиков на ступне ортопедического устройства (рис. 4). Тензометрические датчики реагируют на взаимодействие стопы поврежденной ноги с устройством. Целью устройства является снижение давления на стопу с сохранением функциональных возможностей ноги пациента. Таким образом, выявляя превышение определенного уровня давления на стопу во время движения, микроконтроллер должен выработать управляющее воздействие на исполнительный элемент для усиления фиксации ортеза, тем самым увеличив жесткость системы.

Уровень жесткости фиксации ортеза на ноге пациента будет определяться из условия наличия отклонения от среднеквадратичного значения силомоментного воздействия на сенсорные элементы в стопе устройства с предустановленной пятипроцентной трубкой точности:

$$X_{cp} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (1)$$

где n — число интегрированных в стопу датчиков; x — показание датчика; i — номер датчика. Алгоритм работы

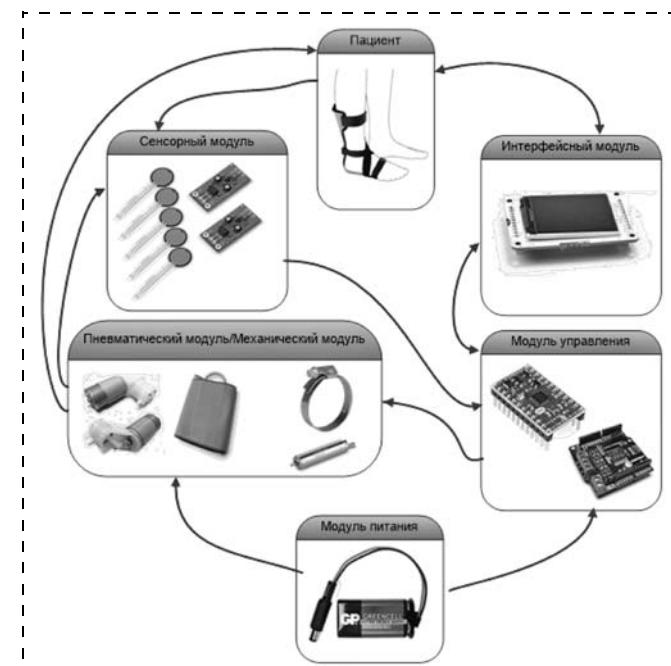


Рис. 3. Обобщенная схема активного ортопедического устройства

программы принятия решения о необходимом усилении или ослаблении фиксации должен включать в себя обработку набора данных, полученных от информационной системы ортеза. Ручное управление фиксацией должно позволять пациенту вести настройку чувствительности системы, а также контролировать уровень фиксации для комфорта использования устройства.

Автоматический режим работы позволяет отслеживать историю воздействия стопы пациента

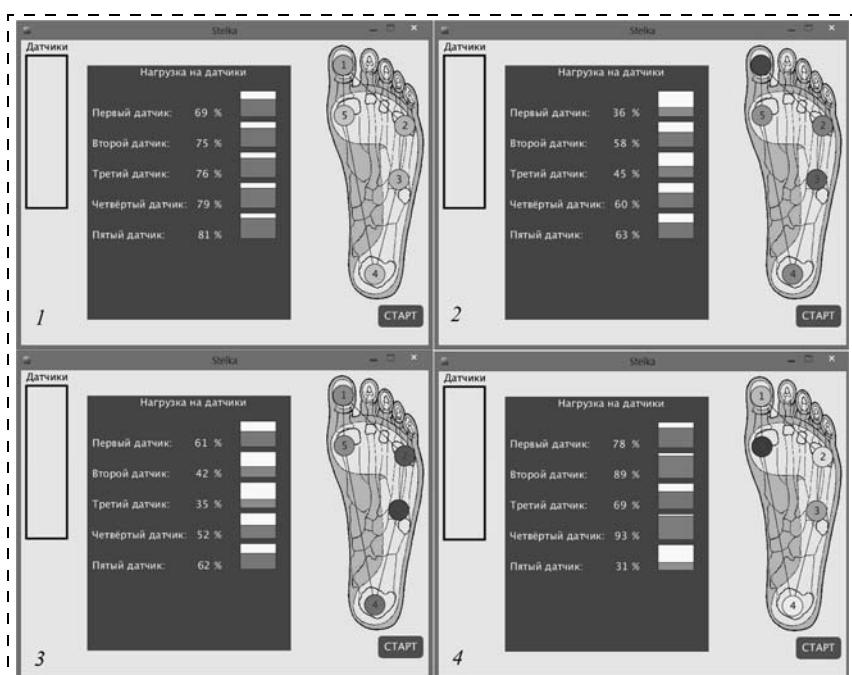


Рис. 4. Динамика изменений показаний датчиков при ходьбе

на ортез, а также следить за текущим уровнем среднеквадратичного значения $X_{\text{ср}}$ (RMS) давления. Полученные данные поступают для обработки, и на основе этой информации вырабатывается решение о работе исполнительной системы. Динамические нагрузки на стопу повышают уровень давления между стопой пациента и ортезным устройством и дают оценку изменения RMS давления за определенный период времени, что позволяет сделать вывод о перемещении человека и, следовательно, необходимости увеличения фиксации.

Статические нагрузки не дают относительного изменения значения RMS давления, однако нахождение значения RMS давления в пределах зоны допустимости, определяемой чувствительностью системы и настраиваемой пользователем, позволяет поддерживать текущий уровень фиксации. При отсутствии или существенном снижении значения RMS давления на стопу и незначительном изменении значения RMS давления во времени система может сделать вывод о том, что пациент не нуждается в дальнейшей фиксации и может ослабить фиксацию ортеза.

Система принятия решения реализуется на основе применения технологии нечеткой логики и составления правил и функций принадлежности, включающих необходимую информацию о показаниях тензометрических сенсоров и изменении значения RMS давления во времени (рис. 5).

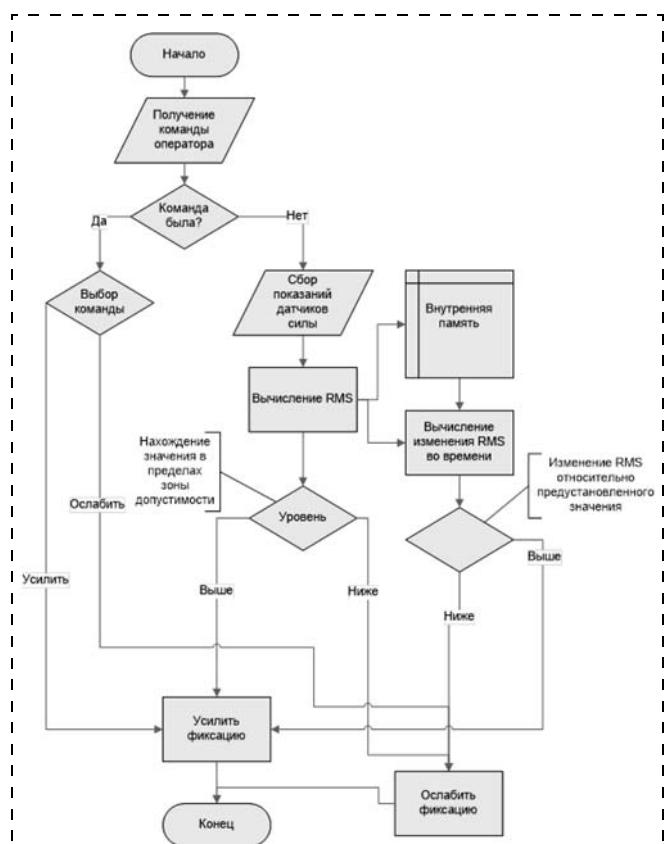


Рис. 5. Цикл работы системы принятия решения

Заключение

В результате проведенных аналитических и экспериментальных исследований была синтезирована система оцифровки силомоментного воздействия на опорную поверхность ноги человека с минимальными временными задержками без потери полезности сигналов с выводом изображения и усредненного значения давления на ЖК дисплей.

По итогам анализа номограмм, полученных в ходе экспериментальных исследований, было выявлено минимальное число сенсоров, необходимых для интеграции в экспериментальной модели, что позволит существенно снизить себестоимость системы по сравнению с существующими аналогами.

Решена задача создания экономичной модели стелек-сенсоров давления и носимого блока с системой оцифровки и обработки снимаемых сигналов и ЖК дисплеем для индикации измеряемой относительной интегральной нагрузки на стопу. Перспективами дальнейших исследований в данной области могут быть:

- создание полуавтоматической системы управления боковой компрессией ортеза по сигналам от сенсоров давления для регулировки уровня разгрузки;
- построение макетного образца активного ортеза, отладка, тестирование и доводка созданной системы управления степенью разгрузки ортезом пораженной конечности.

Список литературы

1. Травматология: национальное руководство / Под ред. Г. П. Котельникова, С. П. Миронова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 808 с.
2. Зоря В. И., Васильев А. П., Корчебный Н. Н., Лужников И. Б. Лечение ложных суставов трубчатых костей у подростков и взрослых // Сб. тезисов Межд. конгресса "Современные технологии в травматологии, ортопедии: ошибки и осложнения — профилактика и лечение". 05—07.10.2004, Москва. С. 36.
3. Ключевский В. В. Хирургия повреждений. Ярославль: ДИА-пресс, 1999. С. 198—203.
4. Никитин С. Е., Ключевский В. В. Ортезотерапия в системе лечения переломов и их последствий // Хирургия повреждений. Руководство для хирургов и травматологов районных больниц, врачей участковых больниц, фельдшеров ФАП и здравпунктов. М.: ГЭОТАРМедиа, 2013. С. 336—369.
5. Азизян Р. В. Комплексное лечение множественных переломов нижних конечностей с применением ортезов: Автореферат канд. мед. наук, Ереван — 2002.
6. Гаркавенко Ю. Е., Поздеев А. П. Ошибки и осложнения при удлинении нижней конечности у детей // Вестник гильдии протезистов-ортопедов. 2002. № 3. С. 61—63.
7. Каулен В. Д. Функциональное лечение диафизарных переломов голени укороченными гипсовыми повязками. Автореферат канд. мед. наук. М., 1989 г.
8. Кашигина Е. А., Панфилов В. М., Никифорова Е. А. Функциональное лечение диафизарных переломов голени // Вестник Российской государственной медицинского университета. 2003. № 5 (31). С. 51—55.
9. Корж А. А., Меженина Е. П., Печерский А. Г., Рынденко В. Г. Справочник по травматологии и ортопедии / Под ред. А. А. Коржа и Е. П. Межениной. Киев: Здоров'я, 1980. С. 216.
10. Дащевский И. Н., Никитин С. Е. Экспериментальное изучение и биомеханическое моделирование функции разгрузки туторов нижних конечностей. Препринт РАН. Ин-т проблем механики; № 968. М., 2011. 57 с.

11. Дашевский И. Н., Никитин С. Е. Биомеханика разгрузки нижних конечностей при ортезировании // Российский журнал биомеханики. 16 с. (в печати).
12. Юревич Е. И. Основы робототехники. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 401 с.
13. Mehrholz J., Pohl M. Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton devices // *J. Rehabil. Med.* 2012. Mar; 44 (3): 193–9.
14. Ермолов И. Л., Градецкий В. Г., Князков М. М., Семёнов Е. А., Суханов А. Н., Крюкова А. А. Motion Control Algorithms for the Exoskeleton Equipped with Pneumatic Drives. *Nature Inspired Mobile Robotics* // Proc. of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. 2013. P. 27–34.
15. Ермолов И. Л., Градецкий В. Г., Князков М. М., Семёнов Е. А., Суханов А. Н. The Dynamics of the Exoskeleton Leg as a Multibody System // The 2nd Joint Internat. Conf. on Multibody System Dynamics May 29–June 1. 2012. Stuttgart, Germany.
16. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. СПб: БХВ-Петербург, 2014. 400 с.
17. Ермолов И. Л., Градецкий В. Г., Князков М. М., Семёнов Е. А., Суханов А. Н. Исследование ноги экзоскелета как многозвенной системы // Матер. конф. "Автоматизация и Информационные технологии", 24 марта 2011, Москва. С. 50–54.
18. Caldwell G., Darwin, Tsagarakis G., Nikolaos. Development and Control of a 'Soft-Actuated' Exoskeleton for Use in Physiotherapy and Training // *Autonomous Robots*. July 2003. Vol. 15, N. 1. P. 21–33.

Development of the Control Algorithms for the Semiautomatic Orthosis Devices

I. N. Dashevsky, dash@ipmnet.ru, **M. M. Knyazkov**, ipm_labrobotics@mail.ru✉,

A. N. Sukhanov, sukhnov-artyom@yandex.ru,

Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russian Federation

Corresponding author: Knyazkov Maksim M., Ph. D., Senior Researcher,
Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, 119526, Russian Federation, e-mail: ipm_labrobotics@mail.ru

Received on October, 31, 2016

Accepted on November, 21, 2016

This paper is devoted to the research and development of the control techniques for the semiautomatic orthosis devices of human limbs. Such devices are used for rehabilitation of the human limbs after various injuries or diseases. The designed orthosis devices should be equipped with a set of the force-sensors, adaptive control algorithms and software for an intellectual adjustment to a patient. This allows creation of a reliable system for rehabilitation. Force-sensors are used to obtain information from a patient during walking. Based on this data the designed controller forms the desired control for the assistance device to provide support for the patient. Also, there is a manual control mode. In this mode the controller receives commands from a patient via a human-machine interface. The fixation system represented by a motor or an air pump adjusts the orthosis with the optimal force on the patient's limb. The current parameters are sent to an LCD monitor. The experiments demonstrated forces from the patients' feet during different physical exercises. The parameters for an air pump switching were obtained. These parameters were used for the control algorithms in the controller.

Keywords: biomechanics, assistance, mechanics of strength and fracture of materials, simulation, active orthosis device

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project number 14-08-01266.

For citation:

Dashevsky I. N., Knyazkov M. M., Sukhanov A. N. Development of the Control Algorithms for the Semiautomatic Orthosis Devices, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 233–238.

DOI: 10.17587/mau.18.233-238

References

1. Kotelnikov G. P., Mironov S. P., *Travmatologiya: nacionalnoe rukovodstvo* (Traumatology: national manual), Moscow, GEHOTAR-Media, 2008, 808 p. (in Russian).
2. Zorya V. I., Vasilev A. P., Korchebnyj N. N., Luzhnikov I. B. *Lechenie lozhnyh sostavov trubchatyh kostej u podrostkov i vzroslyh* (Treatment of false joints of tubular bones in adolescents and adults), Proc. of International Congress "Modern technologies in traumatology and orthopedics: mistakes and complications — prevention, treatment", 05–07.10.2004, Moscow, p. 36. (in Russian).
3. Klyuchevskij V. V. *Hirurgiya povrezhdenij* (Surgery of injuries) Yaroslavl, 1999, pp. 198–203 (in Russian).
4. Nikitin S. E., Klyuchevskij V. V. *Ortezoterapiya v sisteme lecheniya perelomov i ih posledstvij* (Arteterapia in the treatment of fractures and their consequences), *Khirurgiya povrezhdenii. Rukovodstvo dlya khirurgov i travmatologov raiionnykh bol'nis, vrachei uchastkovykh bol'nis, fel'dsherov FAP i zdравpунктов* (Surgery of injuries. A guide for surgeons and traumatologists of district hospitals, local hospitals, paramedics, health posts), Moscow, GEHOTARMedia, 2013, pp. 336–369 (in Russian).
5. Azizyan R. V. *Kompleksnoe lechenie mnozhestvennyh perelomov nizhnih konechnostej s primeneniem ortezov* (A complex treatment of multiple fractures of the lower extremities with the use of orthoses devices), Abstract of Cand. med. of Sciences, Erevan, 2002 (in Russian).
6. Garkavenko Y. E., Pozdeev A. P. *Oshibki i oslozhneniya pri udlenenii nizhnej konechnosti u detej* (Mistakes and complications when extending the lower limbs of children), *Vestnik Gildii Protezistov-Ortopedov*, 2002, no.3, pp. 61–63. (in Russian).
7. Kaulen V. D. *Funktionalnoe lechenie diafizarnykh perelomov goleni ukorochenymi gipsovymi povyazkami* (Functional treatment of diaphyseal fractures of the tibia with shortened casts), *Abstract of Cand. med. of Sciences*, Moscow, 1989 (in Russian).
8. Kashigina E. A., Panfilov V. M., Nikiforova E. A. *Funktional'noe lechenie diafizarnykh perelomov goleni* (Functional treatment of diaphyseal fractures of the tibia), *Vestnik Rossijskogo gosudarstvennogo medicinskogo universiteta*, 2003, no. 5 (31), pp. 51–55 (in Russian).
9. Korzh A. A., Mezhenina E. P., Pecherskij A. G., Ryndenko V. G. *Spravochnik po travmatologii i ortopedii* (Handbook of traumatology and orthopedics), Kiev, Zdorovya, 1980, p. 216 (in Russian).
10. Dashevskij I. N., Nikitin S. E. *Eksperimentalnoe izuchenie i biomekhanicheskoe modelirovaniye funkciy razgruzki tutorov nizhnih konechnostej* (Experimental investigation and biomechanical modeling of the unloading function of lower limb splints.), Moscow, 2011, 57 p. (Preprint/ RAS. IPM RAS; № 968) (in Russian).
11. Dashevskij I. N., Nikitin S. E. *Biomekhanika razgruzki nizhnih konechnostej pri ortezirovaniu* (Biomechanics of the unloading of the

lower extremities in the orthotics), *Russian Journal on Biomechanics*, 16 p. (in Russian).

12. **Yurevich E. I.** *Osnovy robototekhniki* (Fundamentals of robotics), BHV-Peterburg, 2-d edition, 2005, 401 p. (in Russian).

13. **Mehrholz J., Pohl M.** Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton devices, *J. Rehabil. Med.*, 2012, Mar; 44 (3): 193–9.

14. **Ermolov I. L., Gradeckij V. G., Knyaz'kov M. M., Semyonov E. A., Suhanov A. N., Kryukova A. A.** Motion Control Algorithms for the Exoskeleton Equipped with Pneumatic Drives. Nature Inspired Mobile Robotics, *Proc. of the 16th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines*, 2013, pp. 27–34.

15. **Ermolov I. L., Gradeckij V. G., Knyaz'kov M. M., Semyonov E. A., Suhanov A. N.** The Dynamics of the Exoskeleton Leg as a Multibody System, *The 2nd Joint International Conference on Multibody System Dynamics*, 2012, May 29–June 1, Stuttgart, Germany.

16. **Petin V. A.** *Proekty s ispolzovaniem kontrollera Arduino* (The projects using the Arduino controller), BHV-Peterburg, 2014, 400 p. (in Russian).

17. **Ermolov I. L., Gradeckij V. G., Knyaz'kov M. M., Semyonov E. A., Suhanov A. N.** *Issledovanie nogi ekzoskeleta kak mnogozvennoj sistemy* (The study of the leg of the exoskeleton as a multilink system), in proceedings of *Avtomatizaciya i Informacionnye Tekhnologii*, 2011, pp. 50–54 (in Russian).

18. **Caldwell G. Darwin, Tsagarakis G. Nikolaos.** Development and Control of a ‘Soft-Actuated’ Exoskeleton for Use in Physiotherapy and Training, *Autonomous Robots*, July 2003, vol. 15, no. 1, pp. 21–33.

УДК 531.3

DOI: 10.17587/mau.18.238-245

А. В. Борисов, канд. техн. наук, доц., BorisowAndrey@yandex.ru,
Л. В. Кончина, канд. физ.-мат. наук, доц., la_kon@mail.ru,
Филиал ФГБОУ ВО НИУ "МЭИ" в г. Смоленске

Сравнительный анализ алгоритмов управления экзоскелетом со звеньями переменной длины¹

Рассматривается актуальная задача автоматизации движения антропоморфных систем. Проводится сравнительный анализ двух подходов к решению задачи управления движением экзоскелета: управление путем считывания и усиления управляемых импульсов человека и управление с использованием аналитических алгоритмов управления движением. Отличием данной работы от имеющихся является использование в экзоскелете звеньев переменной длины.

Ключевые слова: экзоскелет, алгоритмы управления, звено переменной длины, кинематические характеристики движения, управляющие моменты

Введение

При моделировании опорно-двигательного аппарата человека изменение длины звена связано со многими факторами: 1) с силами и реакциями, возникающими при ходьбе, вызывающими деформации кости и хрящевых тканей сустава; 2) со смещениями в суставе за счет синовиальной жидкости, неидеальности самой формы сустава; 3) с изменением длины звена за счет того, что кость не является идеально прямым стержнем; 4) с изменением положения оси вращения при перекатывании головки кости по мениску при движении в коленном суставе (рис. 1).

В работе [2] указывается, что вызванное неучтенным перекатыванием кости в коленном суставе изменение длины звена приводит к травмам человека при использовании экзоскелета с абсолютно твердыми звеньями. В этой же работе предложена эквивалентная кинематическая модель, основанная на кулачках неправильной формы, моделирующих контакт кость-кость в коленном суставе человека, чей контур получается путем определения мгновенного центра вращения. В качестве основного инструмента измерения использована систе-

ма видеонаблюдения, в результате получена информация о перемещениях мгновенного центра вращения в области коленного сустава.

Следовательно, изменение длины звена связано не только с действием сил и моментов сил при движении, но и с изменением длины за счет геометрии конечности в связи с переменностью взаимного положения звеньев опорно-двигательного аппарата человека. Описать изменение длины звена под влиянием факторов различной природы наиболее эффективно можно, приняв в качестве модели звено переменной длины как функции времени, полагая, что все характеристики (угол поворота, длина, положение центра масс звена) являются функциями времени: $\varphi = \varphi(t)$, $l = l(t)$, $\Delta l = \Delta l(t)$, $C_l = C_l(t)$.

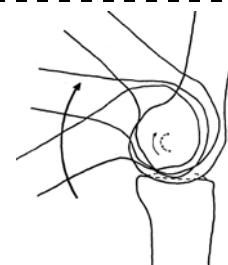


Рис. 1. Траектория мгновенных центров вращения (отмечена точками) в здоровом коленном суставе человека [1]

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-41-03224p_центр_A).

В случае движения экзоскелета возможна реализация активных управляющих моментов в виде электрических двигателей с датчиками угла поворота, угловой скорости и блока управления с обратной связью. Активные моменты создают необходимые тормозящие усилия при постановке ноги на опору и ускоряющие усилия при отталкивании ноги от опоры. При торможении возможна рекуперация энергии и, тем самым, снижение энергозатрат при движении экзоскелета, так как проблема высокого энергопотребления при движении экзоскелета и антропоморфного робота является актуальной. Практическая реализация управляющего момента является актуальной задачей управления и рассматривается в данном исследовании.

1. Описание математической модели звена переменной длины

В данной работе предлагается макроскопически рассматривать конечность и считать, что деформируется не сам сустав, а весь стержень, моделирующий звено. Предлагается модель стержня переменной длины с возможностью приложения в суставах управляющих моментов, с помощью которых можно поддерживать вертикальное положение и осуществлять перемещение. В реальности элементы скелета не прямые, а кривые. Сечения костей являются переменными, кроме того, кость внутри имеет сложную, многослойную структуру. Для моделирования будем выделять из кости среднюю линию и рассматривать экзоскелет из прямолинейных стержней, изменяющих свою длину с течением времени. Реальный сустав заменяется шарниром, в котором может создаваться необходимый управляющий момент. Проводим приближение биомеханических систем стержневыми системами с шарнирами.

Рассмотрим стержень переменной длины, представленный на рис. 2, где φ — угол поворота стержня, C_{l_0} — начальное положение центра масс стержня, C_l — текущее положение центра масс стержня, l_0 — начальная длина ненагруженного стержня, l — текущая длина стержня при движении. Тогда изменение длины стержня можно представить в виде

$$\Delta l = l - l_0. \quad (1)$$

При $\Delta l < 0$ происходит сжатие стержня, при $\Delta l > 0$ — растяжение.

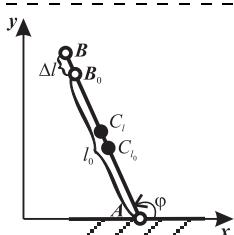


Рис. 2. Изменение длины стержня при его движении

В шарнире A стержня приложен момент $M(t)$, который является управлением в модели и определяет вращательное движение стержня.

Допущения для такой модели стержня:

1) предполагаем, что имеют место только небольшие изменения длины звена, в этом случае относительное удлинение $\frac{\Delta l}{l_0} \ll 1$, где $\Delta l = l_0 - l$. Од-

нако скорость изменения длины звена \dot{l} — величина значительная, и ею пренебречь нельзя;

2) в данной работе движение многозвенного механизма рассматривается как задача динамики механической системы. При этом используются дифференциальные уравнения Лагранжа 2-го рода для жестких стержней в предположении, что длины стержней являются функциями времени $l = l(t)$. Зависимость $l = l(t)$, т.е. изменение параметров во время ходьбы, нужно рассматривать как задачу параметрической идентификации [3]. Обычно задачу параметрической идентификации решают методом расширения пространства состояний, в рассматриваемом случае для n -звенного механизма считаем, что длины $l_i(t)$ ($i = 1, \dots, n$) являются дополнительными степенями свободы, т.е. обобщенными координатами, имея, таким образом, еще n обобщенных координат. Изменение $l(t)$ происходит под действием сил, работающих на растяжение—сжатие вдоль стержня заданным образом и в поле силы тяжести Земли, которое влияет только на перемещение центра масс. Считаем, что $l(t) = l_0 + \Delta l(t)$,

причем $\frac{\Delta l}{l_0} \ll 1$. При периодической ходьбе длина

$\Delta l(t) = A \sin \omega t$, или наоборот, если нагрузка меняется по закону $F(t) = F_0 \sin \omega t$, то можно найти из полученных уравнений $\Delta l(t)$;

3) влияние действия силы тяжести на движения стержня пренебрежимо мало. Это значит, что уравнения для $l(t)$ можно рассматривать независимо от $\varphi(t)$ и найти или задать закон изменения $l(t)$, а затем подставить в уравнения для $\varphi(t)$ и решать уравнения с периодически изменяющимися коэффициентами, отбрасывая малые члены.

Изменение длины звена может быть физически реализовано в реальной модели экзоскелета различными способами, например, моделью стержня переменной длины [4, 5], постоянной длины с упругим элементом на конце или в виде телескопического звена. Модель стержня переменной длины представлена также в работе [6], в статье [7] описана стержневая модель с упругими шарнирами. В статье [8] рассматривается управление экзоскелетом нижних конечностей при вязкоупругой связи с телом человека. Вопросам управления механическими системами посвящены работы [9—11].

В данной статье представлена новая модель, состоящая из невесомого стержня переменной длины и трех сосредоточенных масс, расположенных на стержне.

2. Модель звена переменной длины с массами в шарнирах-суставах и между ними

Рассмотрим схематическую модель одного подвижного звена с управлением в точке шарнирного крепления, показанную на рис. 3. Модель состоит из одного невесомого стержня переменной длины и трех точечных масс, сосредоточенных на отрезке AB : одна масса между точками A и B и массы в шарнирах-суставах, расположенных на концах стержня (рис. 3). Массами в шарнирах-суставах, кроме самих подвижных соединений, может моделироваться электродвигатель, установленный на оси шарнира, имеющий значительную массу и создающий управляющий момент.

Так как в дальнейшем будем рассматривать многозвенные системы, сразу введем двухиндексные обозначения, первый индекс у которых будет обозначать номер звена, второй — номер точечной массы на этом звене. В точке A есть масса m_{10} , в точке C — масса m_{11} , в точке B — масса m_{12} . Придавая каждой массе определенное значение, можно получить распределение масс на стержне таким, чтобы оно примерно соответствовало инерционным свойствам звена опорно-двигательного аппарата человека.

Положение массы в точке C , находящейся на стержне между его концами и не совпадающей с ними, будем задавать с помощью множителя n_{11} ($0 < n_{11} < 1$), являющегося константой. Тогда длина

$AC = n_{11}l_1(t)$ является переменной величиной — функцией времени. Таким образом, точечная масса, находящаяся на стержне между его концами, совершает сложное движение — вращательное около полюса (нижней точки звена A) и поступательное вдоль AB . Такое же движение совершает и точечная масса, расположенная в точке B . Данный способ позволяет учесть изменение положения массы во время движения звена при изменении его длины.

Задача заключается в получении дифференциальных уравнений движения для однозвенной и многозвенных систем и обобщений для создания эффективных матричного и рекуррентного алгоритмов записи дифференциальных уравнений движения для многозвенных систем.

Рис. 3. Схематическая модель экзоскелета с одним подвижным звеном переменной длины и весомыми шарнирами-суставами

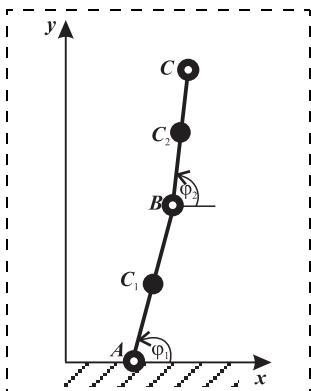


Рис. 4. Модель экзоскелета с двумя подвижными звеньями переменной длины и весомыми шарнирами-суставами

Для решения этой задачи используем дифференциальные уравнения Лагранжа второго рода.

Кинетическую энергию звена будем вычислять, подсчитывая кинетическую энергию каждой сосредоточенной на звене массы и затем суммируя их:

$$T = \frac{1}{2}(m_{12} + m_{11}n_1^2)(\dot{l}_1^2 + l_1^2\dot{\phi}_1^2). \quad (2)$$

Потенциальная энергия равна

$$P = (m_{12} + m_{11}n_1)gl_1\sin\phi_1. \quad (3)$$

Система дифференциальных уравнений движения рассматриваемой стержневой модели, описывающая изменение угловой координаты и длины звена, имеет вид

$$\begin{aligned} l_1^2(m_{12} + m_{11}n_1^2)\ddot{\phi}_1 + gl_1(m_{12} + m_{11}n_1)\cos\phi_1 + \\ + 2l_1(m_{12} + m_{11}n_1^2)\dot{l}_1\dot{\phi}_1 = M_1; \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} -l_1(m_{12} + m_{11}n_1^2)\dot{\phi}_1^2 + g(m_{12} + m_{11}n_1)\sin\phi_1 + \\ + (m_{12} + m_{11}n_1^2)\ddot{l}_1 = F_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Начальные условия имеют вид

$$\phi_1|_{t=0} = \phi_{10}; \dot{\phi}_1|_{t=0} = \dot{\phi}_{10}; \quad (6)$$

$$l_1|_{t=0} = l_{10}; \dot{l}_1|_{t=0} = \dot{l}_{10}. \quad (7)$$

Рассмотрим систему с двумя подвижными звеньями. Модель состоит из двух невесомых стержней переменной длины и трех точечных масс на каждом стержне, сосредоточенных в центре масс стержня и в шарнирах-суставах, расположенных на концах стержня (рис. 4).

В точке A стержня AB сосредоточена масса m_{10} , в точке C_1 — масса m_{11} , в точке B — масса m_{12} . Стержень BC в точке A имеет массу m_{20} , в точке C_2 — массу m_{21} , в точке B — массу m_{22} . Все остальные обозначения аналогичны однозвенной модели.

Кинетическую энергию звена будем вычислять, подсчитывая кинетическую энергию каждой сосредоточенной на звене массы и затем суммируя их.

$$\begin{aligned} T = \frac{1}{2}[(m_{11}n_1^2 + m_{12} + m_{20})(\dot{l}_1^2 + l_1^2\dot{\phi}_1^2) + \\ + m_{21}((\dot{l}_1\sin\phi_1 + \dot{l}_2\sin\phi_2 + l_1\cos\phi_1\dot{\phi}_1 + l_2\cos\phi_2\dot{\phi}_2)^2 + \\ + (\dot{l}_1\cos\phi_1 + \dot{l}_2\cos\phi_2 - l_1\sin\phi_1\dot{\phi}_1 - l_2\sin\phi_2\dot{\phi}_2)^2) + \\ + m_{22}((\dot{l}_1\sin\phi_1 + \dot{l}_2\sin\phi_2 + l_1\cos\phi_1\dot{\phi}_1 + l_2\cos\phi_2\dot{\phi}_2)^2 + \\ + (\dot{l}_1\cos\phi_1 + \dot{l}_2\cos\phi_2 - l_1\sin\phi_1\dot{\phi}_1 - l_2\sin\phi_2\dot{\phi}_2)^2)]. \end{aligned} \quad (8)$$

Система дифференциальных уравнений движения рассматриваемой стержневой модели, описывающая изменение угловой координаты и длины звена, имеет вид

$$\begin{aligned} l_1^2(m_{11}n_1^2 + m_{12} + m_{20} + m_{21} + m_{22})\ddot{\phi}_1 + \\ + l_1l_2(m_{22} + m_{21}n_2)\cos(\phi_1 - \phi_2)\ddot{\phi}_2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + l_1 l_2 (m_{22} + m_{21} n_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \varphi_2^2 + \\
& + g l_1 (m_{11} n_1 + m_{12} + m_{20} + m_{21} + m_{22}) \cos \varphi_1 + \\
& + 2 l_1 (m_{11} n_1^2 + m_{12} + m_{20} + m_{21} + m_{22}) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + \\
& + 2 l_1 (m_{22} + m_{21} n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 - \\
& - l_1 (m_{22} + m_{21} n_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_2 = M_1 - M_2; \quad (9)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& l_1 l_2 (m_{22} + m_{21} n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 + \\
& + l_2^2 (m_{22} + m_{21} n_2^2) \ddot{\varphi}_2 - \\
& - l_1 l_2 (m_{22} + m_{21} n_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 + \\
& + g l_2 (m_{22} + m_{21} n_2) \cos \varphi_2 + 2 l_2 (m_{22} + m_{21} n_2) \times \\
& \times \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + 2 l_2 (m_{22} + m_{21} n_2^2) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 + \\
& + l_2 (m_{22} + m_{21} n_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_1 = M_2; \quad (10)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& l_2 (m_{22} + m_{21} n_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_2 - \\
& - l_1 (m_{11} n_1^2 + m_{12} + m_{20} + m_{21} + m_{22}) \dot{\varphi}_1^2 - \\
& - l_2 (m_{22} + m_{21} n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \varphi_2^2 + \\
& + g (m_{11} n_1 + m_{12} + m_{20} + m_{21} + m_{22}) \sin \varphi_1 + \\
& + 2 (m_{22} + m_{21} n_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_2 \dot{\varphi}_2 + \\
& + (m_{11} n_1^2 + m_{12} + m_{20} + m_{21} + m_{22}) \ddot{l}_1 + \\
& + (m_{22} + m_{21} n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_2 = F_1; \quad (11)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - l_1 (m_{22} + m_{21} n_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{\varphi}_1 - \\
& - l_1 (m_{22} + m_{21} n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{\varphi}_1^2 - \\
& - l_2 (m_{22} + m_{21} n_2^2) \dot{\varphi}_2^2 + g (m_{22} + m_{21} n_2) \sin \varphi_2 - \\
& - 2 (m_{22} + m_{21} n_2) \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \dot{l}_1 \dot{\varphi}_1 + \\
& - (m_{22} + m_{21} n_2) \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \ddot{l}_1 + \\
& + (m_{22} + m_{21} n_2^2) \ddot{l}_2 = F_2. \quad (12)
\end{aligned}$$

Рассматривая модели с тремя и более подвижными звеньями, которые здесь не приводятся ввиду громоздкости уравнений, получаем обобщения для механизма с n подвижными звеньями переменной длины. Структура уравнений [4] остается прежней, изменяются входящие в них матрицы.

Уравнение, описывающее изменение угла φ , имеет вид

$$\begin{aligned}
& A(q, l) \ddot{q} + B(q, l) \dot{q}^2 + g C(q) l + \\
& + 2 D(q, l) (\dot{l} \dot{q}) + E(q, l) \ddot{l} = M(q, l). \quad (13)
\end{aligned}$$

Уравнение, описывающее изменение длины звена, имеет вид

$$\begin{aligned}
& G(q, l) \ddot{q} + H(q, l) \dot{q}^2 + g K(q) + \\
& + 2 L(q, l) (\dot{l} \dot{q}) + P(q, l) \ddot{l} = F(q, l), \quad (14)
\end{aligned}$$

где q — угловые обобщенные координаты $q = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)^T$; l — обобщенные координаты, описывающие изменения длины звеньев $l = (l_1, \dots, l_n)^T$; $A(q, l)$, $B(q, l)$, $G(q, l)$, $H(q, l)$ — матрицы, учитывающие инерционные свойства; $C(q)$, $K(q)$ — матрицы, определяемые моментами силы тяжести; $D(q, l)$, $E(q, l)$, $L(q, l)$, $P(q, l)$ — матрицы, учитывающие переменную длину звеньев; $M(q, l)$, $F(q, l)$ — матрицы-столбцы обобщенных сил; \ddot{q} — матрица обобщенных ускорений; \dot{q} — матрица обобщенных скоростей, тогда $\dot{q}^2 = (\dot{\varphi}_1^2, \dots, \dot{\varphi}_n^2)^T$; $(\dot{l} \dot{q})$ — произведение $\dot{l} \dot{q}$ при равных индексах.

Приведем в качестве примера выражение для матрицы A :

$$a_{ij} = l_i l_j (m_{ij} n_j \tilde{\delta} n_i + \sum_{\beta=i+1}^2 \sum_{k=j+1}^n m_{k\beta} \cos(\varphi_i - \varphi_j)), \quad (15)$$

где символ $\tilde{\delta} n_i = \begin{cases} n_j, & i=j; \\ 1, & i \neq j. \end{cases}$

Уравнения сохраняют свою структуру, добавляются только новые слагаемые, введенные дополнительные массы.

3. Управление движением с помощью эмпирически определенных кинематических характеристик движения

В настоящее время наиболее перспективным и целесообразным видом управления движением экзоскелета представляется считывание нервных сигналов человека, их усиление и реализация приводами экзоскелета. В работе [12] показано, что для управления движением экзоскелета достаточно простого усиления в заданное число раз управляющих им-

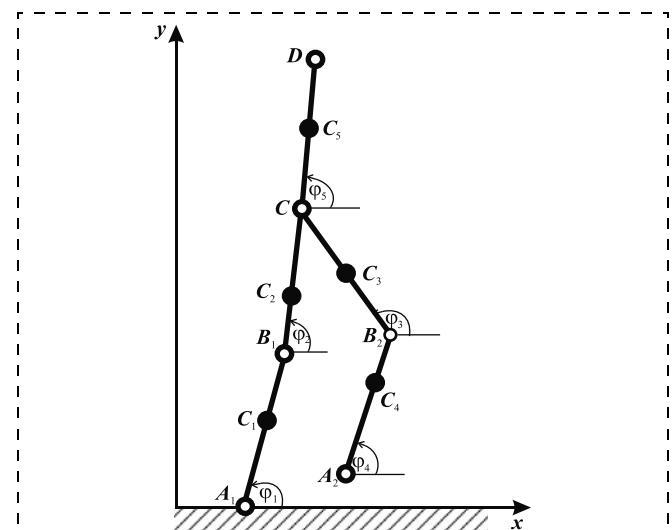


Рис. 5. Модель экзоскелета с пятью подвижными звеньями переменной длины

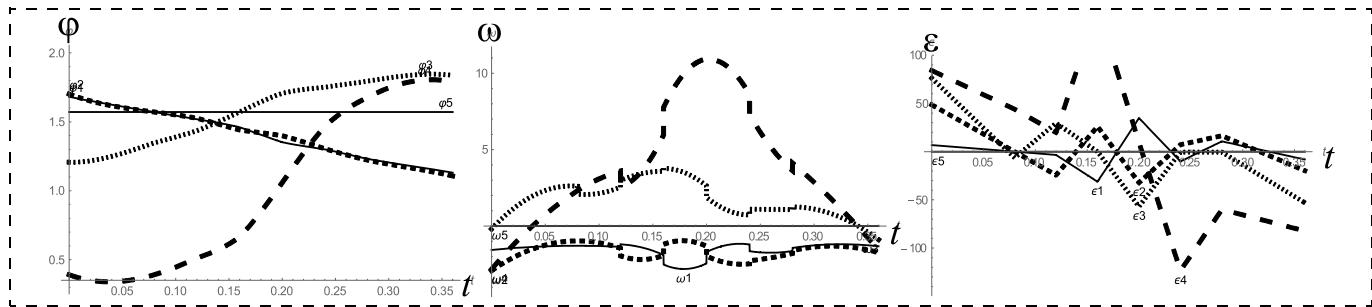


Рис. 6. Зависимость угла поворота, угловой скорости и углового ускорения подвижных звеньев экзоскелета от времени

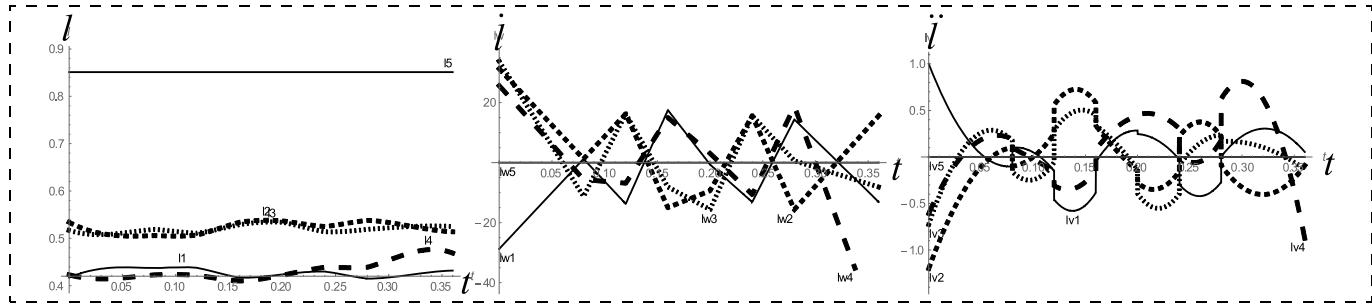


Рис. 7. Изменение длины звеньев экзоскелета и ее первой и второй производных по времени

пульсов человека. На этой основе решим обратную задачу динамики эмпирическим путем.

Рассмотрим модель экзоскелета, состоящую из пяти подвижных звеньев (рис. 5). Уравнения модели в матричной форме имеют вид (13) и (14).

В проведенных нами исследованиях [13] экспериментально были определены углы поворота и изменения длины звеньев, возникающие в опорно-двигательном аппарате человека при ходьбе. Проводя сплайновую интерполяцию полиномами третьей степени, получаем дважды дифференцируемые функции зависимости углов поворота и изменения длин звеньев от времени, приведенные на рис. 6 и 7.

Анализируя построенные зависимости углового перемещения от времени, можно сделать вывод, что полученные результаты для угловой скорости и углового ускорения соответствуют данным биомеханики [14]. Слишком большие значения, полученные в начале и конце движения для углового

ускорения, можно объяснить тем, что начальные условия определяли исходя из интерполяционных полиномов, а не непосредственными измерениями. Результаты проведенных расчетов близки к биомеханическим данным, приводимым в литературе, которые получены непосредственными измерениями [15].

Нами разработана методика анимационной пиктографической визуализации движения, в которой по имеющимся зависимостям углов от времени создаются анимационные модели движения. В качестве иллюстрации на рис. 8 представлены кадры кинограммы пиктографической визуализации исходного эмпирического движения.

На основании полученной эмпирической информации о движениях человека решим обратную задачу динамики — по известным кинематическим характеристикам определим усилия в шарнирах-суставах между подвижными элементами стержневой биомеханической системы. Для этого решаем линейную относительно управляемых моментов систему дифференциальных уравнений движения (13).

На рис. 9 показаны управляемые моменты, которые определяют движение следующих звеньев: M_1 — голени опорной ноги, M_2 — бедра опорной ноги, M_3 — бедра переносимой ноги, M_4 — голени переносимой ноги, M_5 — корпуса.

По приведенным зависимостям видно, что управление реальной ходьбой человека имеет ярко выраженный импульсный характер. Наблюдаются качественное совпа-

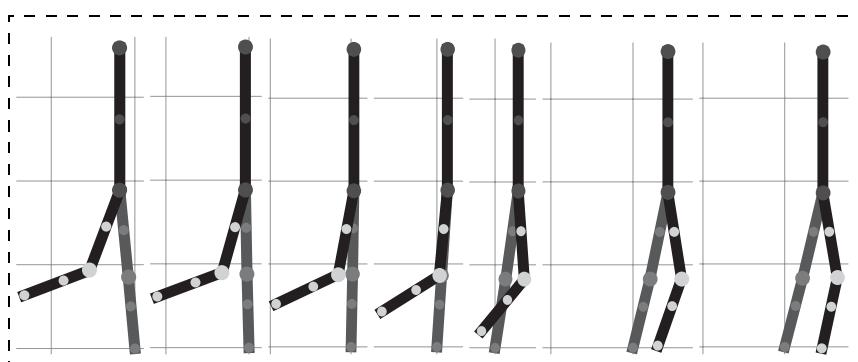


Рис. 8. Кадры кинограммы исходного эмпирического движения экзоскелета

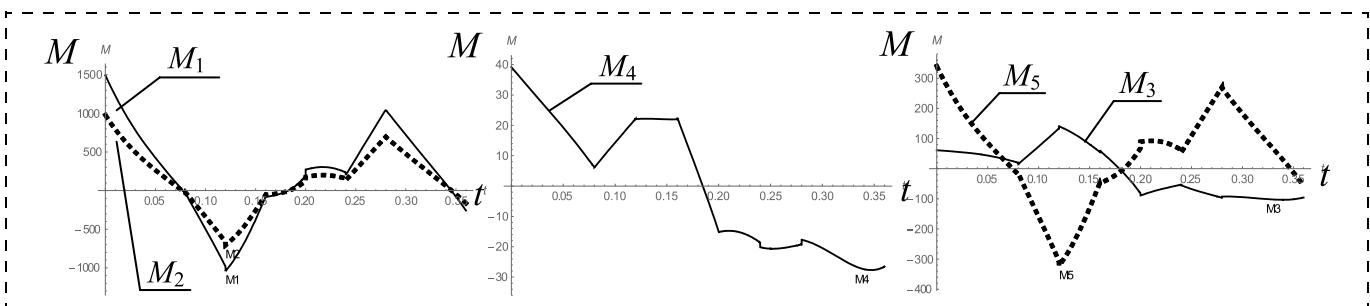


Рис. 9. Зависимости управляемых моментов в шарнирах-суставах экзоскелета от времени

дение управляемых моментов для обоих звеньев опорной ноги. Для переносимой ноги подобие выражено не так сильно.

Таким образом, эмпирически решена обратная задача динамики для экзоскелета со звеньями переменной длины.

4. Управление движением с помощью аналитически задаваемых кинематических характеристик движения

В некоторых случаях, например для людей с проблемами опорно-двигательного аппарата, для тренировки мышц при восстановлении двигательных функций человека или в спорте для тренировок с помощью экзоскелета и его частей, необходимо чтобы управление осуществлялось с помощью заданного алгоритма [16, 17]. Рассмотрим алгоритм управления на основе периодических функций, обеспечивающих антропоморфность походки экзо-

скелета [18]. Зададим функции изменения углов и длин звеньев механизма следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1(t) &= \pi/2 + j_1 \sin[f_1 - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2]; \\
 \varphi_2(t) &= \pi/2 + j_2 \cos[f_2 - (1 - \cos[2\pi t/T])\pi/2]; \\
 \varphi_3(t) &= \pi/2 + j_3 \cos[f_3 - (1 + \cos[2\pi t/T])\pi/2]; \\
 \varphi_4(t) &= \pi/2 + j_4 \sin[f_4 - (1 + \cos[2\pi t/T])\pi/2]; \\
 \varphi_5(t) &= \pi/2; \\
 l_1(t) &= l_1^* + l_1^* l \sin[2\pi t/T]; \\
 l_2(t) &= l_2^* + l_2^* l \sin[2\pi t/T]; \\
 l_3(t) &= l_3^* - l_3^* l \sin[2\pi t/T]; \\
 l_4(t) &= l_4^* - l_4^* l \sin[2\pi t/T]; \\
 l_5(t) &= l_5^* + l_5^* l \sin[2\pi t/T],
 \end{aligned} \quad (16)$$

где T — период ходьбы; j_i и f_i ($i = 1, \dots, 4$) — параметры ходьбы; l_i^* — начальная длина недеформированного звена; l — коэффициент изменения длины звена.

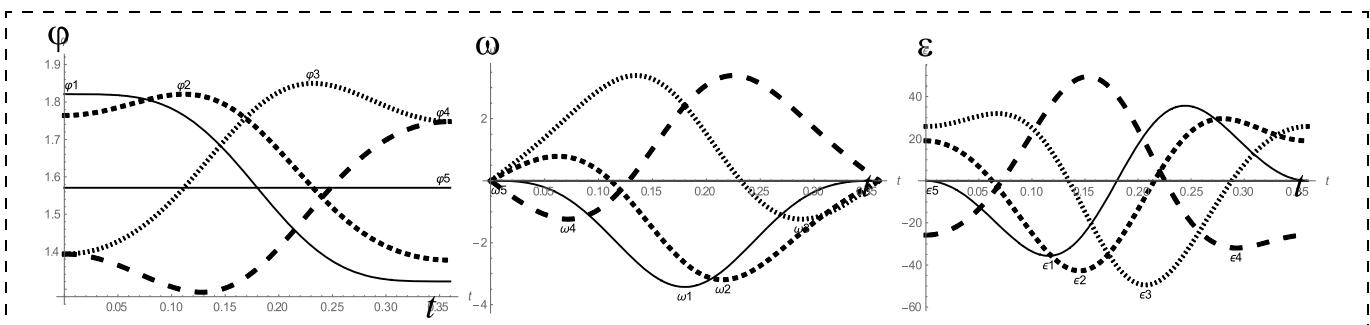


Рис. 10. Зависимость угла поворота, угловой скорости и углового ускорения подвижных звеньев экзоскелета от времени

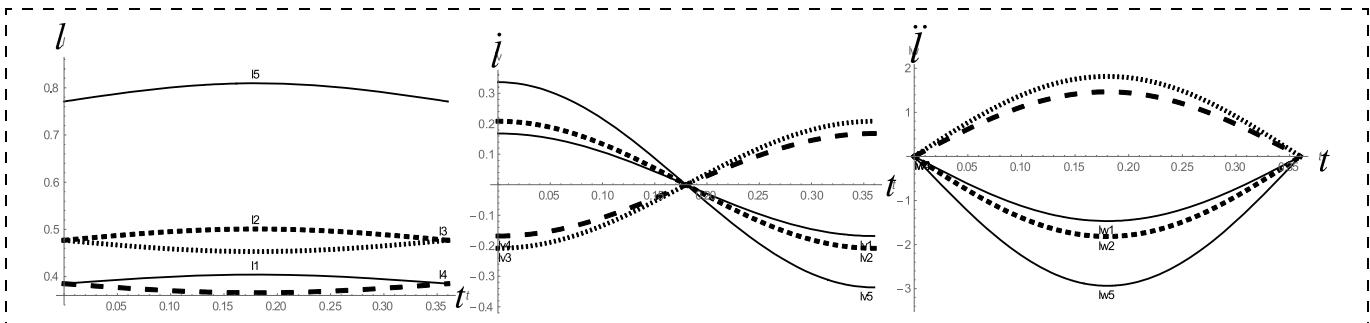


Рис. 11. Изменение длины звеньев экзоскелета и ее первой и второй производных по времени

Приведем графики задаваемых аналитически углов, угловых скоростей и угловых ускорений (рис. 10), изменения длин звеньев, их скоростей и ускорений (рис. 11), а также кадры анимации получившейся походки (рис. 12).

Управляющие моменты при такой ходьбе имеют вид, представленный на рис. 13. На рис. 13 моменты определяют движение тех же звеньев, что и на рис. 9.

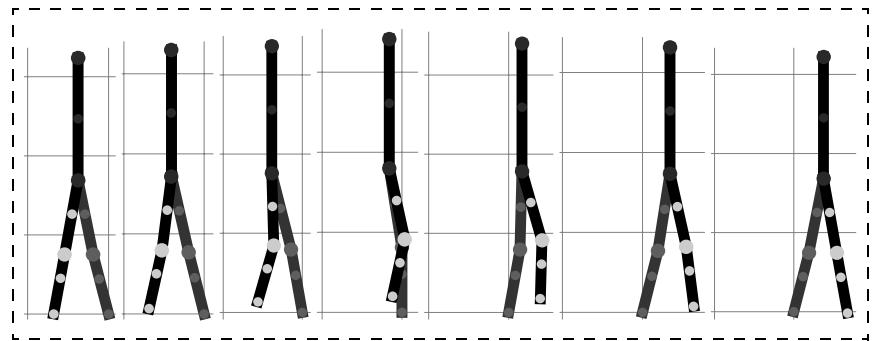


Рис. 12. Кадры кинограммы движения экзоскелета

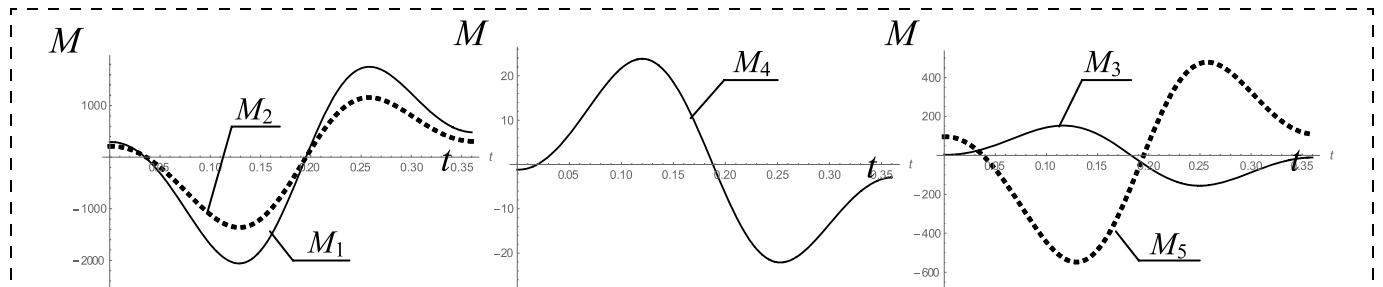


Рис. 13. Зависимости управляющих моментов в шарнирах-суставах экзоскелета от времени

Сопоставляя полученные моменты (рис. 13) с моментами, определенными эмпирическим путем (см. рис. 9) на реальных людях, видим, что качественная форма зависимостей моментов от времени сохраняется. Однако значение управляющих моментов, полученных с помощью периодических функций, больше, чем определенных на основе эмпирических данных о ходьбе человека.

Заключение

В результате проведенного исследования установлено, что походка на основе теоретически задаваемых периодических функций более энергозатратна, чем реальная ходьба человека. Этим, в частности, объясняется, почему энергозатраты современных антропоморфных роботов при ходьбе выше, чем у человека.

Список литературы

1. **Basic biomechanics of the musculoskeletal system** / Margaret Nordin, Victor H. Frankel ed. Lippincott Williams & Wilkins, 2001.
2. **Piña-Martínez E., Rodriguez-Leal E.** Inverse Modeling of Human Knee Joint Based on Geometry and Vision Systems for Exoskeleton Applications // Mathematical Problems in Engineering. Vol. 2015 (2015). 14 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2015/145734>. URL: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/145734/>
3. **Справочник** по теории автоматического регулирования / Под ред. А. А. Красовского М.: Наука, 1987.
4. **Борисов А. В.** Автоматизация проектирования стержневых экзоскелетов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 10. С. 29–33.
5. **Борисов А. В.** Автоматизация разработки трехмерных моделей экзоскелетов со звеньями переменной длины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 12. С. 828–835.
6. **Леонов Г. А., Зегжда С. А., Кузнецов Н. В., Товстик П. Е., Товстик Т. П., Юшков М. П.** Движение твердого тела, управляемое шестью стержнями переменной длины // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455, № 3. С. 282–286.
7. Андреев А. С., Перегудова О. А. Об управлении двухзвенным манипулятором с упругими шарнирами // Нелинейная динамика. 2015. Т. 11, № 2. С. 267–277.
8. Лавровский Э. К., Письменная Е. В., Комаров П. А. Управление ходьбой экзоскелетона нижних конечностей при вязкоупругой связи его с телом человека-оператора // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 2. С. 96–101.
9. Градецкий В. Г., Князков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Движение мобильного робота по горизонтальным, наклонным и вертикальным поверхностям при наличии возмущений и подвижных препятствий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 3. С. 166–173.
10. Черноуско Ф. Л., Болотник Н. Н. Мобильные роботы, управляемые движением внутренних тел // Тр. ИММ УрО РАН. 2010. Т. 16, № 5. С. 213–222.
11. Черноуско Ф. Л., Ананьевский И. М., Решмин С. А. Методы управления нелинейными механическими системами. М.: Физматлит, 2006. 328 с.
12. Борисов А. В., Кончина Л. В., Абросов Я. А. Разработка методов управления моделью экзоскелета с деформируемыми звеньями и человеком внутри // Естественные и технические науки. 2016. № 7 (97). С. 58–60.
13. Борисов А. В. Моделирование опорно-двигательного аппарата человека и применение полученных результатов для разработки модели антропоморфного робота М.: Спутник+, 2009. 212 с.
14. Зациорский В. М., Аруин А. С., Селюнов В. Н. Биомеханика двигательного аппарата человека. М.: Физкультура и спорт, 1981. 143 с.
15. Yamada H. Strength of biological materials. Baltimore: Williams and Wilkins, 1970. 405 p.
16. Головин В. Ф., Архипов М. В., Павловский В. Е. Особенности проектирования робототехнических систем для восстановительной медицины // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 10. С. 664–671.
17. Алисейчик А. П., Орлов И. А., Павловский В. Е., Павловский В. В., Платонов А. К. Механика и управление экзоскелетами нижних конечностей для нейрореабилитации спинальных больных // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов (Казань, 20–24 августа 2015 г.). Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2015. 319 с.
18. Бербюк В. Е. Динамика и оптимизация робототехнических систем. Киев: Наукова Думка, 1989. 192 с.

Comparative Analysis of the Exoskeleton Control Algorithms with the Links of a Variable Length

A. V. Borisov, BorisowAndrey@yandex.ru , **L. V. Konchina**, la_kon@mail.ru,
Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk,
Smolensk, 214013, Russian Federation

*Corresponding author: Borisov Andrew V., Ph. D., Associate Professor, Chair of Higher Mathematics,
Branch of the National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk,
Smolensk, 214013, Russian Federation, e-mail: BorisowAndrey@yandex.ru*

Received on September 25, 2016

Accepted on October 14, 2016

Automation of movement of the anthropomorphic systems is an important task. It requires development of various motion control algorithms. Control of the exoskeleton is typically done using the reader and gain of the control pulses of a person. However, such a control cannot be implemented, for example, for the recovery of the motor abilities after injuries of the vertebrae and for learning to walk again, or in sports training with the help of the exoskeleton or its parts. In this case, the analytical motion control algorithms are required. The article presents a comparative analysis of these two approaches to the task of the motion control of the exoskeleton. As an illustration, the authors present a graphical dependence of the basic kinematic and dynamic parameters of the walking time and footage of the split-pictorial visualization of a model of an exoskeleton. The difference of this work from the existing ones is in the use of the exoskeleton links of a variable length. The paper describes a model of a link of a variable length in the form of a weightless rod and three lumped masses located at the ends of the rod, and an arbitrary point of the rod between its ends. The masses in the hinges-joints, except the movable joints, can be modeled by a motor mounted on a hinge pin having a substantial mass and creating the control point. Giving each lot a certain value, it is possible to obtain such a distribution of the masses on the rod, which approximately corresponds to the inertial properties of the link in the musculoskeletal system of a person. The differential equations of motion for the single-link and multi-chain systems were obtained. Generalizations for development of an effective matrix and recursive algorithms for writing differential equations of motion for the multi-link systems composed of links of variable length were composed. A study revealed that control of a real human walk had a pronounced pulsed character, while a gait, based on the theoretically specified periodic functions, was more energy intensive than a real human walk. This, in particular, explains why the energy consumption of the modern anthropomorphic robots during walking is higher than that of humans.

Keywords: exoskeleton, control algorithms, link of variable length, the kinematic characteristics of the motion, control points

Acknowledgements: This work was supported by RFBR (grant number 15-41-03224r_tsentr_A)

For citation:

Borisov A. V., Konchina L. V. Comparative Analysis of the Exoskeleton Control Algorithms with the Links of a Variable Length, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 238–245.

DOI: 10.17587/mau.18.238-245

References

1. **Nordin M., Frankel V. H.** ed. Basic biomechanics of the musculoskeletal system. Lippincott Williams & Wilkins, 2001.
2. **Piña-Martínez E., Rodriguez-Leal E.** Inverse Modeling of Human Knee Joint Based on Geometry and Vision Systems for Exoskeleton Applications, *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015 (2015), 14 p., <http://dx.doi.org/10.1155/2015/145734>. available at: <http://www.hindawi.com/journals/mpe/2015/145734/>
3. **Krasovskii A. A.** ed. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo regulirovaniya* (Manual control theory), Moscow, Nauka, 1987 (in Russian).
4. **Borisov A. V.** *Avtomatizacija proektirovaniya sterzhnevyh jekzokskeletov* (Computer-aided design of rod exoskeletons), *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 10, pp. 29–33 (in Russian).
5. **Borisov A. V.** *Avtomatizacija razrabotki trehmernyh modelej jekzokskeletov so zven'jami peremennoj dliny* (Automating the development of three-dimensional models of exoskeletons with units of variable length), *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 12, pp. 828–835 (in Russian).
6. **Leonov G. A., Zegzhda S. A., Kuznecov N. V., Tovstik P. E., Tovstik T. P., Jushkov M. P.** *Dvizhenie tverdogo tela, upravlyaemoe shest'ju sterzhnjami peremennoj dliny* (The solid-state movement, controlled by six rods of variable length), *Doklady Akademii Nauk*, 2014, vol. 455, no. 3, pp. 282–286 (in Russian).
7. **Andreev A. S., Peregudova O. A.** *Ob upravlenii dvuhzvennym manipulatorom s uprugimi sharnirami* (On management articulated manipulator with elastic joints), *Nelinejnaja Dinamika*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 267–277 (in Russian).
8. **Lavrovskij Je. K., Pis'mennaja E. V., Komarov P. A.** *Upravlenie hod'boj jekzokskeletona nizhnih konechnostej pri vjazkouprugoj svjazi ego s telom cheloveka-operatora* (Managing walking exoskeleton lower extremities with viscoelastic its connection with the body of a human operator), *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 96–101 (in Russian).
9. **Gradeckij V. G., Knjaz'kov M. M., Semjonov E. A., Suhanov A. N.** *Dvizhenie mobil'nogo robota po gorizonta'l'nym, naklonnym i vertikal'nym poverhnostjam pri nalichii vozmushchenij i podvizhnyh prepjatstvij* (Mobile robot movement on horizontal, sloping and vertical surfaces in the presence of disturbances and moving obstacles), *Mekhanika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 166–173 (in Russian).
10. **Chernous'ko F. L., Bolotnik N. N.** *Mobil'nye robony, upravlyaemye dvizheniem vnutrennih tel* (Mobile robots controlled by the movement of internal bodies), *Tr. IMM UrO RAN*, 2010, vol. 16, no. 5, pp. 213–222 (in Russian).
11. **Chernous'ko F. L., Anan'evskij I. M., Reshmin S. A.** *Metody upravlenija nelinejnimi mehanicheskimi sistemami* (Control methods of nonlinear mechanical systems), Moscow, Fizmatlit, 2006, 328 p. (in Russian).
12. **Borisov A. V., Konchina L. V., Abrosov Ja. A.** *Razrabotka metodov upravlenija model'ju jekzokskeleta s deformiruemymi zven'jami i chelovekom vnutri* (Development of model management exoskeleton with deformable links and man inside), *Estestvennye i Tehnicheskie Nauki*, 2016, no. 7 (97), pp. 58–60 (in Russian).
13. **Borisov A. V.** *Modelirovaniye oporno-dvigatel'nogo apparata cheloveka i primenie poluchennih rezul'tatov dlya razrabotki modeli antropomorfogo robota* (Modeling of human musculoskeletal system and use the results to develop a model anthropomorphic robot), Moscow, Sputnik +, 2009, 212 p. (in Russian).
14. **Zaciorskij V. M., Aruin A. S., Seljanov V. N.** *Biomehanika dvigatel'nogo apparata cheloveka* (Biomechanics of human musculoskeletal apparatus), Moscow, Fizkul'tura i sport, 1981, 143 p. (in Russian).
15. **Yamada H.** Strength of biological materials, Baltimore: Williams and Wilkins, 1970, 405 p.
16. **Golovin V. F., Arhipov M. V., Pavlovskij V. E.** *Osobennosti proektirovaniya robototekhnicheskikh sistem dlya vossstanovitel'noj mediciny* (Features of designing robotic systems for regenerative medicine), *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 664–671 (in Russian).
17. **Alisejchik A. P., Orlov I. A., Pavlovskij V. E., Pavlovskij V. V., Platonov A. K.** *Mehanika i upravlenie jekzokskeletami nizhnih konechnostej dlya nejroreabilitacii spinal'nyh bol'nyh* (Mechanics and management of lower extremity exoskeleton for neurorehabilitation of patients with spinal), *XI Vserossijskij s'ezd po fundamental'nym problemam teoretycheskoj i prikladnoj mehaniki. Annotacii dokladov* (Kazan', 20–24 august 2015), Kazan', Publishing house of Akademia nauk RT, 2015, 319 p. (in Russian).
18. **Berbjuk V. E.** *Dinamika i optimizacija robototekhnicheskikh sistem* (Dynamics and optimization of robotic systems), Kiev, Naukova Dumka, 1989, 192 p. (in Russian).

КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.518

DOI: 10.17587/mau.18.246-256

В. Н. Белопухов, канд. техн. наук, науч. сотр., bvnsam@mail.ru,

С. Ю. Боровик, д-р техн. наук, вед. науч. сотр., borovik@iccs.ru,

М. М. Кутейникова, науч. сотр., kuteynikova@iccs.ru,

П. Е. Подлипнов, мл. науч. сотр., perodlypnov@yandex.ru,

Ю. Н. Секисов, д-р техн. наук, зав. лаб., sekisov@iccs.ru,

О. П. Скобелев, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., borovik@iccs.ru,

Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук, г. Самара

Измерение радиальных зазоров с повышенной чувствительностью в расширенном диапазоне осевых смещений рабочего колеса турбины

Приводится описание системы измерения радиальных зазоров (РЗ) и осевых смещений торцов лопаток сложной формы, применяемых в турбинах современных и перспективных газотурбинных двигателей. В системе предусмотрена возможность применения как известного, так и вновь разработанного кластерного метода измерения, обеспечивающего повышенную чувствительность к РЗ в расширенном диапазоне изменений осевых смещений торцов лопаток. Рассматриваются результаты экспериментальных исследований — метрологических показателей и проверки работоспособности прототипа системы с кластером высокотемпературных одновитковых вихревоковых датчиков, чувствительные элементы которых выполнены в виде отрезка проводника.

Ключевые слова: турбина, лопатки сложной формы, радиальные и осевые смещения, одновитковый вихревоковый датчик, система измерения, экспериментальные исследования

Введение

Известен метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы с повышенной кривизной поверхности пера, применяемых в турбине (сечение такой лопатки плоскостью, перпендикулярной ее оси, имеет явно выраженную серповидную форму, а плоскостью, параллельной оси, — U-образную форму за счет выступов в торцевой части). В системе отсчета $OXYZ$, начало которой (точка O) расположено на внутренней поверхности статора, радиальным смещениям соответствует координата u и радиальный зазор (РЗ), осевым — координата x , смещениям в направлении вращения рабочего колеса — координата z [1].

Метод предусматривает использование двух одновитковых вихревоковых датчиков (ОВТД) с чувствительными элементами (ЧЭ) в виде отрезка проводника, которые входят в состав распределенного кластера (РК), смещенного в сторону хвостовой части лопатки. При этом ЧЭ развернуты на угол $30\ldots60^\circ$ против часовой стрелки относительно оси Z , что в процессе вращения рабочего колеса и прохождения лопаткой ЧЭ сопровождается уменьшением его индуктивности до минимального значения, которое в рассматриваемом методе принято считать информативным. Оба датчика включаются в дифференциальную измерительную цепь (ИЦ) с импульсным питанием, приближенным дифферен-

цированием и АЦП на выходе [2]. В свою очередь, включение ИЦ в состав системы обеспечивает получение информации о радиальных и осевых смещениях торцов лопаток (координат u (РЗ) и x). Описание технических и программных средств такой системы, а также результаты ее экспериментальных исследований приведены в работе [1] и в развернутом виде в работах [3—5].

Вместе с тем, при изучении полученных результатов, а также в процессе анализа задач, связанных с измерением РЗ и решаемых разработчиками перспективных газотурбинных двигателей (ГТД), была выявлена необходимость повышения чувствительности к изменениям РЗ (u) и расширения диапазона изменений осевых смещений (x), что оказалось возможным во вновь разработанном кластерном методе [6, 7]. От известного метода (*meth 1*) вновь разработанный (*meth 2*) отличается смещением РК ОВТД в сторону головной части лопатки, а также разворотом ЧЭ на 60° по часовой стрелке относительно оси Z до "квазипараллельности" боковой поверхности пера. При вращении рабочего колеса и прохождении лопаткой ЧЭ из-за наличия выступов в торцевой части лопатки наблюдается два минимума индуктивности ЧЭ. Один из них — наименьший, принято считать информативным.

Представляется очевидным при реализации *meth 2* в технических и программных средствах сис-

темы измерения использовать те же принципы построения (структуру и алгоритмы), что являлись базовыми в реализации *meth 1* [1, 4, 5].

Однако следует особо отметить, что известные достоинства *meth 2* нельзя считать препятствием к применению *meth 1*. В частности, это касается результатов исследований, которые приведены в работе [8], показавших, что повышение чувствительности к изменениям РЗ при использовании *meth 2* может сопровождаться увеличением влияния мешающих факторов, в том числе температуры, изменяющейся в широком диапазоне, и это может стать причиной дополнительных погрешностей. Поэтому при разработке системы измерения, реализующей *meth 2*, предусматривалась возможность использования также и *meth 1*.

В статье приводится описание технических и программных средств системы измерения РЗ и осевых смещений торцов лопаток, применяемых в турбине. При этом в системе предусмотрено использование как *meth 1*, так и *meth 2* (по выбору). Рассматриваются также результаты экспериментальных исследований — метрологические показатели прототипа системы и его работоспособность.

Технические и программные средства системы

Система обеспечивает измерение радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и повышенной кривизны поверхности пера (координат u (РЗ) и x соответственно). Содержит нестандартные и стандартные технические средства (ТС, рис. 1).

Нестандартные ТС включают РК из двух ОВТД (ОВТД₁ и ОВТД₂), предназначенных для использования в турбинах. Предполагается, что в отличие от известных конструкций датчиков [1] в ОВТД₁ и ОВТД₂ встроены по две термопары (ТП₁₁, ТП₁₂ и ТП₂₁, ТП₂₂ соответственно), предназначенные для термокоррекции температурных воздействий на ЧЭ датчиков [9, 10]. К нестандартным ТС относится также преобразователь (ПР), представляющий собой ИЦ с приближенным дифференцированием, включающую преобразователи "ток—напряжение", масштабирующий усилитель и микросхему десятиразрядного АЦП [1]. ПР встроен в линию связи между РК ОВТД и устройством предварительной обработки данных, причем данные с выхода АЦП передаются в виде параллельного кода.

В состав стандартных ТС входит устройство предварительной обработки цифровых данных — встраиваемый модуль STM32F4Discovery на базе микроконтроллера STM32F407VGT6B [11]. Их отличительные особенности: 32-битное ядро Cortex-M3, 1 Мбайт памяти программ, 192 Кбайт ОЗУ, 16-канальный 12-разрядный АЦП, 12-разрядный цифро-

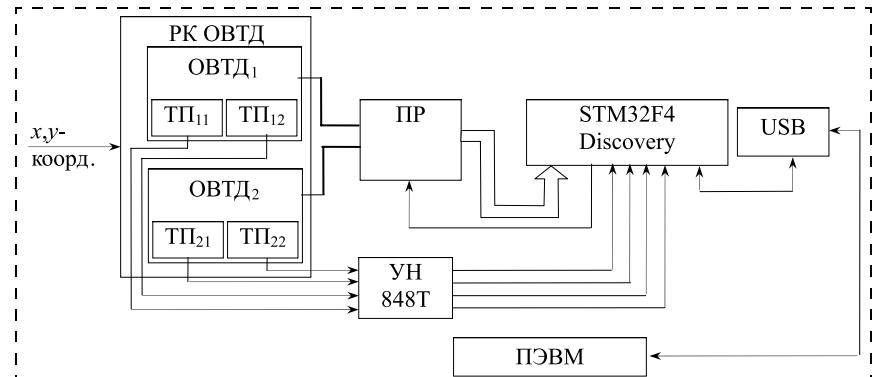


Рис. 1. Технические средства системы измерения

аналоговый преобразователь (ЦАП), набор таймеров общего назначения с расширенными функциями, последовательные коммуникационные интерфейсы UART, достаточное число дискретных портов ввода-вывода¹. Все сигналы доступны на внешних разъемах модулей. Для связи с ПЭВМ верхнего уровня по каналу USB модули дооснащены преобразователями интерфейсов UART ↔ USB.

Для нормализации сигналов от термопар ТП₁₁, ТП₁₂ и ТП₂₁, ТП₂₂ использовано стандартное многоканальное устройство нормализации (УН) 848Т фирмы Rosemount, с выхода которого напряжения поступают на входы АЦП модуля STM32.

Конструктивно модуль STM32 и преобразователь UART ↔ USB смонтированы на кросс-плате. Плата имеет размеры, рекомендуемые стандартом DIN 43880 для размещения в типовых корпусах, закрепляемых на DIN-рейку.

Программное обеспечение (ПО) имеет двухуровневую структуру и ориентировано на реализацию в системе измерения обоих методов (*meth 1* и *meth 2*). На нижнем уровне реализованы алгоритмы предварительной обработки и сжатия цифровых кодов [12, 13], а ПО верхнего уровня традиционно обеспечивает имплементацию алгоритмов управления системой, аппроксимации цифровых кодов и поиска экстремальных значений [12, 14], вычисления искомых координат x и u [15, 16], а также осуществляет конфигурирование системы, оперативное отображение и архивирование измерительной информации.

ПО нижнего уровня содержит секции настройки блока внутреннего тактирования микроконтроллера STM32F407VGT6, инициализации периферийного оборудования и контроллера прерываний, измерения значения постоянной составляющей и уровня шума, сортировки и сжатия входного потока данных, обслуживания последовательного порта приема-передачи данных. Взаимодействие с перифе-

¹ В работе [1] приводится описание устройства аналогичного назначения — модуля STM32 VL Discovery, который, однако, выполнен на базе микроконтроллера с меньшими объемами памяти и скоростью обработки данных (микроконтроллер STM32 F100 RBT6).

рийными устройствами проводится в виде прямого обращения к соответствующим регистрам.

Начало процесса пороговой обработки входного потока при вращении рабочего колеса инициируется подачей команды от ПЭВМ верхнего уровня. При получении этой команды выполняется сортировка отсчетов входного потока в целях выделения полезных сигналов от ИЦ, а также запускаются операции сжатия по адаптивным порогам [13]. Подготовленный таким образом массив полезных кодов дополняется информацией о числе отсчетов и контрольной сумме, а затем передается через последовательный порт UART в ПЭВМ верхнего уровня и становится доступным для дальнейшей обработки.

ПО верхнего уровня системы реализовано в виде SDI-приложения под управлением MS Windows и предполагает отображение информации в значительно более расширенном виде, чем того требует применение системы в реальных условиях измерения. Это было связано с необходимостью проверки работоспособности всех этапов сбора и обработки экспериментальных данных на рабочих режимах функционирования системы и отладки разработанного алгоритмического обеспечения.

По команде оператора для заданной конфигурации эксперимента (объем анализируемой выборки кодов, реализуемый метод измерения (*meth 1* или *meth 2*), режим обработки данных, способ аппроксимации выборок кодов и др.) осуществляется программный запуск процесса измерения, который начинается с формирования стартового импульса для внешних систем предварительной обработки цифровых кодов. Далее сформированный ПО нижнего уровня упакованный массив кодов с результатами измерений передается в ПЭВМ, где происходит его дальнейшая обработка, включая выделение лопаток, нахождение экстремумов, привязка результатов к конкретным лопаткам на рабочем колесе, вычисление искомых x , y -координат смещений торцов лопаток и усреднение результатов по заданному числу оборотов.

Результаты измерений в виде графиков зависимостей экстремумов кодов C_1 и C_2 от номера оборота, вычисленных радиальных и осевых смещений торцов лопаток выводятся на экран монитора. Кроме того, предусмотрена возможность вывода служебной информации, содержащей число элементов сжатого и несжатого массивов данных, коэффициент сжатия, СКО и еще ряд промежуточных сведений, включая оценки систематической и случайной составляющих погрешности измерения. Накопленные результаты измерений автоматически сохраняются в памяти системы в виде текстовых файлов и доступны для дальнейшего анализа и обработки с помощью стороннего ПО.

Результаты экспериментальных исследований

Приводятся результаты экспериментальных исследований прототипа системы измерения ради-

альных и осевых смещений (x , y -координат), в которой реализованы *meth1* и *meth2*. При этом первоначально рассматриваются метрологические показатели в статическом состоянии объекта измерения (контролируемой лопатки), а затем оценивается работоспособность системы в динамике (в процессе вращения контролируемой и соседних лопаток).

Метрологические показатели. Исследуются наиболее значимые показатели — систематические и случайные составляющие погрешностей.

В работе [17], посвященной кластерным методам и средствам измерения многомерных смещений торцов лопаток, предлагается аппроксимация семейства градиуровочных характеристик (ГХ), полученных экспериментально, полиномиальными функциями нескольких переменных, которые в дальнейшем используются для расчета искомых координат методом Ньютона. Однако применение метода возможно только в тех случаях, когда ГХ монотонны в диапазонах изменений искомых координат. Между тем семейство ГХ (зависимости цифровых кодов АЦП на выходе ИЦ ($C_1(x, y)$, $C_2(x, y)$), как правило, монотонны в системе, реализующей *meth1*). А это означает, что согласно работе [19] аппроксимированные ГХ можно использовать как "опорные" для определения систематической составляющей погрешности, которая находится как разность кодов, полученных экспериментально (C_e) и после аппроксимации (C_a) при заданных значениях координат x и y ²:

$$\Delta C = C_e - C_a. \quad (1)$$

Семейство ГХ определяется экспериментально с помощью трехкоординатного градиуровочного устройства, оснащенного механическими индикаторами часового типа с разрешающей способностью 10 мкм [19]. Индикаторы контролируют перемещение лопатки, закрепленной на подвижной платформе³. Методика получения ГХ предусматривала предварительную установку заданных координат x и y , ручной поиск экстремального значения кода C_1 (по координате Z), полученного после операции усреднения на нижнем уровне системы и выведенного на цифровой индикатор (усреднение устраняет случайную составляющую погрешности). Далее процедура повторяется для новых значений координат x в диапазоне ее изменения (при неизменном значении y), а затем и для всех остальных значений координат y).

Аналогичным образом определяются и коды C_2 . Полученные результаты представлены в табл. 1 и использовались как исходные данные для опреде-

² Следует отметить, что в такой редакции систематическая составляющая — это фактически погрешность аппроксимации.

³ Лопатка в целом аналогична тем лопаткам, которые использовались в экспериментах, результаты которых приведены в работе [1], но отличается шириной и высотой выступов.

ления аппроксимирующей функции — степенного полинома с двумя переменными (x, y) вида

$$C = f(x, y) = \sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J A_{i,j} x^i y^j, \quad (2)$$

где $A_{i,j}$ — коэффициенты, I, J — степени полинома.

На рис. 2 в графическом виде представлены результаты аппроксимации — полиномиальная функция $C_{a_1}(x, y)$ (степень $I = 3, J = 9$)⁴.

Там же представлены функции C_{a_2} при тех же значениях степени полинома.

Приведенная систематическая составляющая погрешности имеет вид

$$\delta_C = \frac{\Delta C}{\Delta C_{\max}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где ΔC определяется с помощью выражения (1), $\Delta C_{\max} = 512$ — максимально возможное изменение кода в ИЦ, причем ΔC вычисляется по кодам C_1 и C_2 при координатах x и y в "узлах"

табл. 1 и кодам C_{a_1} и C_{a_2} при тех же

значениях координат. Результаты расчета функций $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$ представлены на рис. 3.

Из графиков рис. 3 следует, что погрешности δ_C невелики, и их максимальные значения не превышают 0,06 %. Вместе с тем, известно, что погрешности аппроксимации при использовании степенных полиномов в промежутках между "узлами" могут быть существенно больше, чем в самих "узлах".

Чтобы дать количественную оценку таким погрешностям, были проведены дополнительные эксперименты, в ходе которых определялись значения кодов C_1 и C_2 при координатах x и y , выбранных в центрах промежутков между соответствующими координатами, приведенными в табл. 1. Затем для тех же координат были вычислены коды C_{a_1} и C_{a_2} , погрешности ΔC и δC (выражения (2), (1) и (3) соответственно). Графики $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$ изображены на рис. 4, и, как видно из графиков, максимальное значение приведенной погрешности не превышает 0,4 %.

Далее рассматриваются результаты оценки систематической составляющей погрешности ИЦ в системе,

Таблица 1
Семейство ГХ $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (meth1)

x, мм	$C_1(x, y)$			$C_2(x, y)$		
	y, мм			x, мм	y, мм	
	0,5	1	1,5		0,5	1
-1	631	579	550	-1	407	443
-0,8	629	578	549	-0,8	411	446
-0,6	627	576	549	-0,6	416	449
-0,4	624	574	547	-0,4	421	452
-0,2	622	573	546	-0,2	426	454
0	619	572	545	0	431	457
0,2	616	570	544	0,2	435	460
0,4	612	568	543	0,4	441	463
0,6	609	565	541	0,6	446	466
0,8	605	563	540	0,8	450	468
1	600	561	539	1	454	471

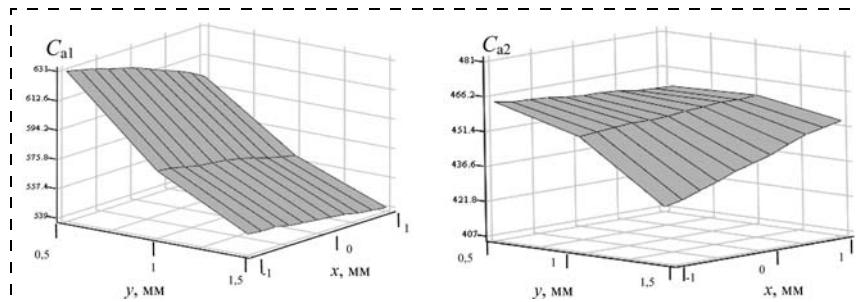


Рис. 2. Аппроксимирующие функции $C_{a_1}(x, y)$ и $C_{a_2}(x, y)$ (meth1)

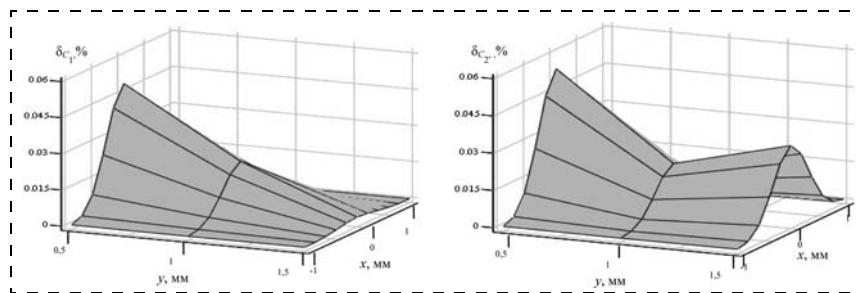


Рис. 3. Систематические составляющие погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$, вычисленные в "узлах" табл. 1 (meth1)

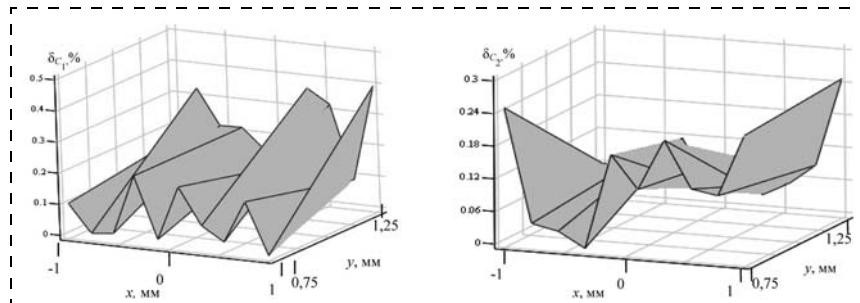


Рис. 4. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$, вычисленные в промежутках между "узлами" табл. 1 (meth1)

⁴ Числовые значения коэффициентов полинома $A_{i,j}$ здесь не приводятся.

Таблица 2
Семейство ГХ $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ (meth2)

$C_1(x, y)$			$C_2(x, y)$				
$x, \text{мм}$	$y, \text{мм}$		$x, \text{мм}$	$y, \text{мм}$			
	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	
-5	548	530	518	-5	358	416	450
-4	578	547	528	-4	315	392	436
-3	612	566	540	-3	271	369	424
-2	651	588	553	-2	236	352	414
-1	692	609	564	-1	215	341	408
0	732	628	574	0	213	340	406
1	761	641	581	1	222	344	408
2	773	646	584	2	231	348	410
3	772	646	584	3	242	354	412
4	758	640	582	4	262	363	417
5	752	635	579	5	287	375	424

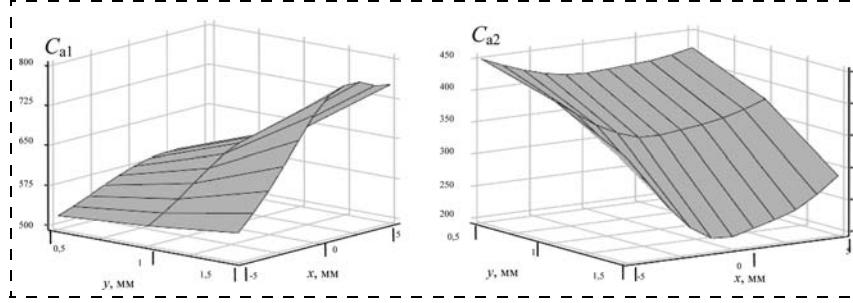


Рис. 5. Аппроксимирующие функции $C_{a1}(x, y)$ и $C_{a2}(x, y)$ (meth2)

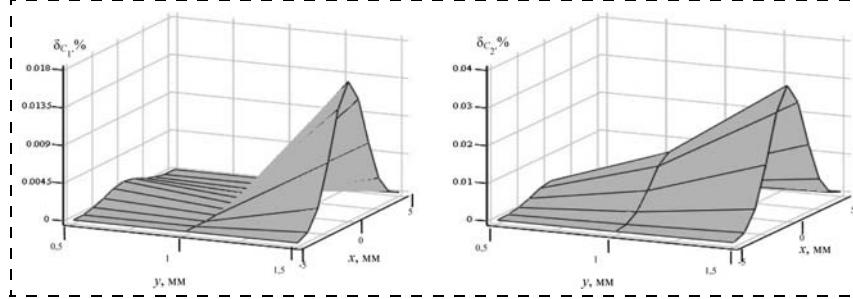


Рис. 6. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$, вычисленные в "узлах" (meth2)

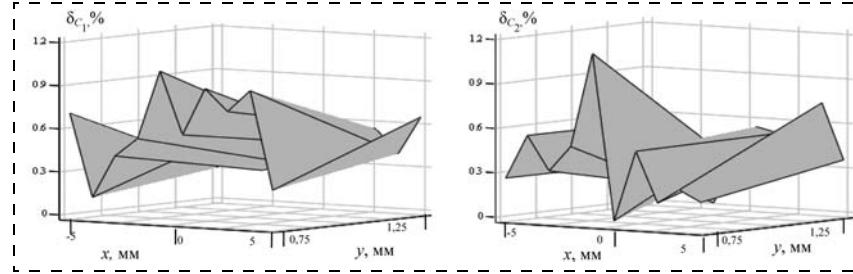


Рис. 7. Приведенные составляющие систематических погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$, вычисленные в промежутках между "узлами" (meth2)

реализующей meth2. Как отмечалось в работе [7], семейство ГХ на уровне первичного преобразователя в виде зависимостей индуктивностей ЧЭ₁ и ЧЭ₂ от координат x и y не монотонны, а потому немонотонны и зависимости кодов АЦП на выходе ИЦ от тех же координат. Но это означает, что применение метода Ньютона невозможно, и для вычисления координат x и y в работах [15, 16] предлагается алгоритм, свободный от указанного ограничения.

Как показано в работе [20], точность вычисления координат x и y тем выше, чем меньше шаг изменений координат в экспериментах по определению семейства ГХ ИЦ и системы измерения. Но это увеличивает трудоемкость процедуры градуировки и временных затрат, которые в конечном счете могут оказаться неприемлемыми, например в практике экспериментальных исследований ГТД.

В связи с этим одним из возможных путей преодоления подобных трудностей является аппроксимация ГХ, полученных с достаточным шагом и приемлемым для пользователей, с последующим использованием аппроксимированных функций для нового табличного представления ГХ со сколь угодно малым шагом для дальнейшего расчета искомых координат.

Вместе с тем, наличие аппроксимирующей функции позволяет найти систематические составляющие погрешности, применяя действия, аналогичные тем, что использовались выше в предположении реализации meth1.

Семейство ГХ ($C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$) для meth2 представлено в табл. 2.

Полученные результаты использовались как исходные данные при определении аппроксимирующих функций, в качестве которых, как и в случае с meth1, выбран полином в виде выражения (2)⁵.

Данные табл. 2, а также полученная аппроксимирующая функция (рис. 5) позволяют найти (с помощью выражений (1)–(2)) приведенные значения систематической составляющей погрешности в "узлах" табл. 2. Графики погрешностей $\delta_{C_1}(x, y)$ и $\delta_{C_2}(x, y)$ приведены на рис. 6.

Как следует из графиков, максимальные значения δ_{C_1} и δ_{C_2} не превышают 0,04 %.

⁵ Числовые значения степени полинома $C_{a1}(x, y)$ остаются без изменений, а коэффициенты $A_{i,j}$ также не приводятся.

Чтобы найти погрешности в промежуточных точках табл. 2, проводится дополнительный эксперимент, аналогичный тому, что предпринимался для *meth1*. Его результаты в графическом виде представлены на рис. 7.

Из графиков видно, что максимальные значения погрешностей δ_{C_1} и δ_{C_2} не превышают 1,2 %.

Эксперименты по оценке случайной составляющей погрешности проводили в статике при фиксированных позициях лопатки относительно датчиков. Объем выборки определялся объемом буферной памяти. Коды АЦП регистрировали в режиме непрерывного импульсного питания ИЦ и оценивали их разброс (отклонение кодов от средних значений).

На рис. 8 в качестве примера представлен фрагмент выборки объемом 105 кодов (C_1) (при использовании *meth2*). Там же в увеличенном масштабе изображен разброс кодов C_1 . Анализ показал, что большая часть кодов не вышла за пределы разброса в ± 2 единицы. Среднеквадратическое отклонение (СКО) составило 1,03. Его относительное значение, приведенное к диапазону изменений выходных кодов (512), составляет около 0,2 %.

Аналогичные эксперименты были проведены для кодов C_2 , а также для кодов C_1 и C_2 , применительно к *meth1*. СКО незначительно отличалось (0,93), а его относительное значение также можно считать приблизительно равным 0,2 %.

Оценка работоспособности. Приводится краткое описание имитатора объекта, обеспечивающего вращательное движение лопаток относительно ОВТД₁ и ОВТД₂ в составе РК, что позволяет дать оценки работоспособности технических и программных средств прототипа системы в целом и, в частности, программ, реализующих алгоритмы предварительной обработки информации, вычисления экстремальных значений кода, а также радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Имитатор объекта содержит имитатор рабочего колеса (ИРК) и имитатор статора (ИС). ИРК представляет собой диск с тремя турбинными лопатками, одна

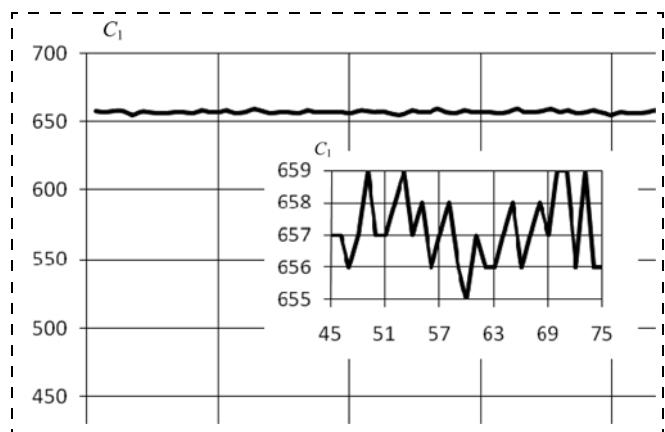


Рис. 8. Фрагменты выборки кодов при $x = -2$, $y = 0,5$ мм (*meth2*)

из которых использовалась в метрологических экспериментах, две остальные подобны первой по форме и размерам. Лопатки размещены на диске с угловым шагом 120°. Электрический привод обеспечивает вращение диска с регулируемой скоростью (от 60 до 1000 мин⁻¹). ИС представляет собой крепежное устройство для РК (ОВТД₁ и ОВТД₂) с механизмом перемещения обоих датчиков в направлении осей X и Y , причем контроль этих перемещений осуществляется индикаторами часового типа с разрешающей способностью до 0,01 мм. Топология размещения ЧЭ ОВТД в составе РК и их ориентация относительно оси Z (направление вращения ИРК) соответствует *meth1* или *meth2* (в зависимости от выбора).

Оценку работоспособности алгоритмов предварительной обработки информации и вычисления экстремальных значений кодов проводили в динамике, т.е. в процессе вращения ИРК в течение одного периода. При этом предполагалось использование только метода *meth2*, поскольку результаты аналогичных исследований для *meth1* были представлены в работе [1]. Радиальные и осевые смещения были установлены с помощью соответствующих индикаторов (0,8 мм (y), -2 мм (x)) и оставались неизменными в течение эксперимента при постоянной скорости вращения (500 мин⁻¹).

На рис. 9 представлены результаты эксперимента — это зависимости кодов на выходе АЦП в течение полного оборота ИРК (при прохождении каждой из трех лопаток ЧЭ обоих датчиков) от номера отсчета (N), соответствующего текущему времени (частота импульсного питания ИЦ постоянна и ее период $T_{\Pi} = 9 \cdot 10^{-6}$ с). Коды остаются постоянными в межлопаточном пространстве (без учета шумовой составляющей). Избыточность, связанная с этими кодами, устраняется в процессе предварительной обработки (рис. 9, *a*), завершает которую адаптивное сжатие (рис. 9, *б*). Перечисленные операции позволяют уменьшить объем данных, передаваемых на верхний уровень, почти на порядок.

Отличительной особенностью зависимостей $C(N)$ при использовании в системе *meth2* (по сравнению с *meth1*) является наличие двух экстремумов, один из которых — информативный (при прохождении лопаткой ЧЭ ОВТД₁ — C_1 , ЧЭ ОВТД₂ — C_2). На рис. 10 показана зависимость $C(N)$ в области экстремума в увеличенном масштабе, где отчетливо видна помеха. Дополнительное увеличение масштаба (см. "аппликацию") позволяет определить экстремальное значение кода (659) и продемонстрировать аппроксимацию параболой, проходящей через 3 точки [12] — экстремум и точки ниже экстремума на примерно 8 единиц (эти точки обведены штриховой линией). При этом разность между экстремальными значениями составляет менее единицы кода (менее 1 %). Представляется очевидным, что выявленный разброс экстремальных значений кодов, связанный с помехами, может быть

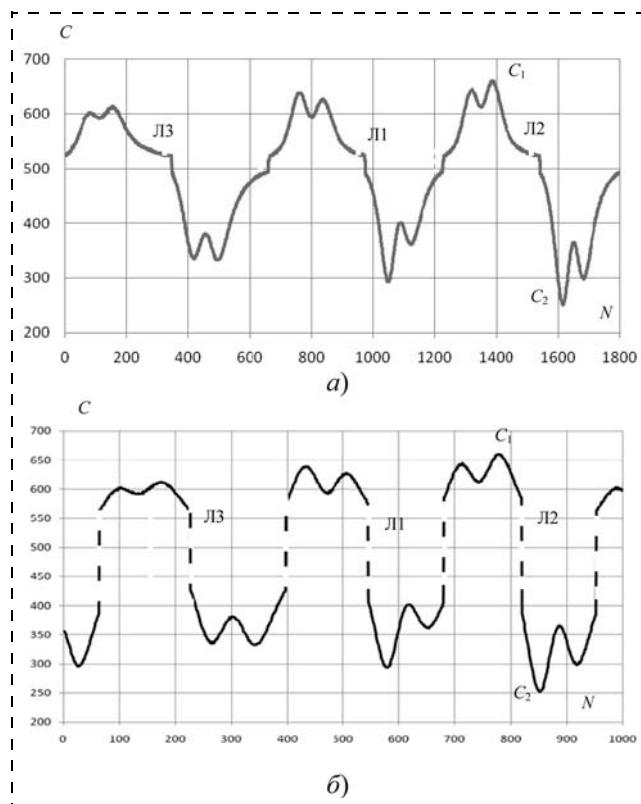


Рис. 9. Устранение избыточности кодов в межлопаточном пространстве (а) и применение аддативного сжатия (б) (meth2)

существенно уменьшен, если использовать предусмотренное в системе усреднение данных за несколько оборотов ИРК. Можно ожидать, что даже четырех оборотов достаточно для уменьшения погрешности примерно в два раза, а 20 оборотов — более чем в четыре.

Оценки работоспособности системы в целом и алгоритма вычислений радиальных и осевых смещений торцов лопаток, в частности, являются итоговыми и, как и предыдущие, проводятся дважды — в предположении использования в системе *meth1* и *meth2*.

Если нет необходимости в учете влияния соседних лопаток, то, как отмечалось в работе [21], до-

статочно одной лопатки при наличии градуировочного устройства, обеспечивающего линейные перемещения лопатки по трем координатам (x , y , z) и их измерения. При этом предполагается, что диаметр рабочего колеса турбины достаточно велик, чтобы считать траекторию вращения торцов лопаток в направлении оси Z на отрезке длиной 20...30 мм практически линейной. Тогда при дополнительном условии применения аналогичных лопаток на рабочем колесе можно воспользоваться метрологически состоятельными семействами ГХ, полученными ранее (табл. 1, 2) в рабочем режиме системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток. Однако ИРК имеет сравнительно небольшой диаметр (около 215 мм), и на указанном выше отрезке траекторию вращения нельзя считать линейной, а потому применение имеющихся семейств ГХ не представляется возможным.

Вместе с тем, в ИС предусмотрена возможность контролируемых индикаторами перемещений в направлении осей X и Y относительно ИРК, а следовательно, и относительно торцов установленных на нем лопаток. Если при этом ИРК будет приведен во вращение и торцы лопаток будут периодически проходить зону чувствительности обоих датчиков в направлении оси Z , а система измерения обеспечит фиксацию экстремальных значений кодов C_1 и C_2 с их выводом пользователю, то имитатор объекта (с ИРК и ИС в его составе) можно использовать, в частности, как своеобразное градуировочное устройство для получения семейств ГХ. В то же время необходимо подчеркнуть, что изготовление ИРК и ИС осуществлялось на лабораторном оборудовании по упрощенным технологиям без какой-либо официальной аттестации, гарантирующей метрологическую состоятельность результатов экспериментов с применением имитатора объекта. Это означает, что в настоящей работе вопросы, связанные с точностью средств измерения и обработки данных, ограничены материалами теоретических исследований, изложенных в работах [20, 22], а также экспериментальными исследованиями систематической и случайной составляющей погрешностей ИЦ в данной статье.

Что же касается имитатора объекта, то его применение может быть связано только с оценками работоспособности аппаратно-программных средств системы, включая завершающую программу, реализующую алгоритм вычисления координат смещения торцов лопаток.

Методика решения такой задачи предполагает ряд последовательных операций: получение семейства ГХ с помощью имитатора объекта (в динамике, т.е. при вращении ИРК), ввод полученных ГХ в систему (как исходных данных для расчета x , y -координат), установку и ввод тестовых зна-

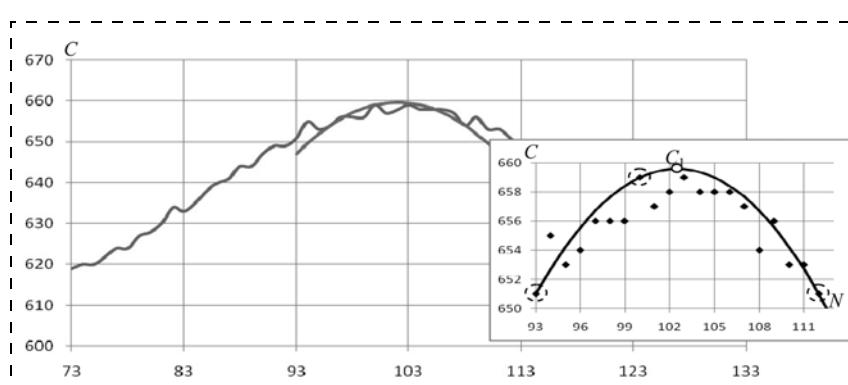


Рис. 10. Функция $C_1(N)$ и ее экстремальные значения с использованием аппроксимации и без нее (meth 2)

Разность заданных и вычисленных значений координат, выраженная в процентах от диапазонов их изменений

Метод	y, мм	Заданные промежуточные значения координат									
		\bar{x}									
		-0,9	-0,7	-0,5	-0,3	-0,1	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
meth1	1,0	2,5	3,5	6,7	8,9	10,9	5,4	11,4	12,0	—	—
		3,75	3,75	3,75	2,5	2,5	1,25	1,25	1,25	—	—
meth2	1,0	1,12	0,88	0,02	-0,12	2,4	1,6	-1,64	-0,2	0,32	-2,14
		5,5	4,0	2,5	2,5	2,5	1,0	5,0	2,5	-1,0	9,25

чений координат x и y , а также их сравнение с полученными результатами вычислений тех же координат.

Для получения семейства ГХ с помощью индикаторов осуществлялась установка заданных значений координат x в диапазонах 2 мм с шагом 0,2 мм (*meth1*) и 10 мм с шагом 1 мм (*meth2*), а координаты y — в диапазоне 0,8 мм (от 0,8 до 1,6 мм с шагом 0,4 мм) для обоих методов⁶. Для каждой пары из возможных сочетаний координат x и y в указанных диапазонах в процессе вращения ИРК для лопатки под номером 2 (Л2) определялись экстремальные значения кодов — максимум C_1 (рабочий ОВТД₁) и минимум C_2 (рабочий ОВТД₂) при использовании программ предварительной обработки кодов АЦП, поиска экстремальных значений и их усреднения на 20 оборотах ИРК. Полученные семейства ГХ-*meth1*, как и ожидалось, монотонны, а ГХ-*meth2* немонотонны. Но характер изменений функций $C_1(x, y)$ и $C_2(x, y)$ аналогичен тем, что представлены в табл. 1, 2 и на рис. 2, 5. Поэтому ни в графическом, ни в табличном виде ГХ-*meth1* и ГХ-*meth2* здесь не представлены. Однако в табличном виде данные обеих разновидностей семейств ГХ вводятся в систему для использования в программе, реализующей вычисление x , y -координат.

Далее в соответствии с предложенной методикой осуществляется подготовка тестовых значений координат x и y . С помощью индикаторов устанавливаются значения x и y , которые являются промежуточными между значениями, использованными при получении семейств ГХ-*meth1* и ГХ-*meth2* (между "узлами" таблиц ГХ).

Приводится во вращение ИРК, проводится измерение, и полученные в цифровом виде результаты с помощью программ предварительной обработки, поиска и вычисления экстремальных значений и их усреднения на 20 оборотах, а также программы вычисления x , y -координат, рассчитываются координаты x и y .

В табл. 3 в предположении использования в системе как *meth1*, так и *meth2* приводятся результаты исследований разности заданных и вычисленных в

системе координат, выраженных в процентах от диапазонов их изменений (2 мм — *meth1* и 10 мм — *meth2*).

При этом по вертикали расположены заданные промежуточные значения координаты y (1,0 мм как для *meth1*, так и *meth2*). По горизонтали одной строкой представлены заданные промежуточные значения x -координаты, выраженной в относительных

единицах ($\bar{x} = \frac{x_{\text{зп}}}{0,5(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})}$, где $x_{\text{зп}}$ — заданное

промежуточное значение ($-0,9; -0,7 \dots +0,5$ для *meth1*, а также $-4,5; -3,5; \dots +4,5$ для *meth2*), а $x_{\text{max}} = +1,0$ мм $x_{\text{min}} = -1,0$ мм для *meth1* и $x_{\text{max}} = +5,0$ мм, $x_{\text{min}} = -5,0$ мм для *meth2*). Вычисленные значения разности, расположенные в "клетках" табл. 3, соответствуют парам выбранных тестовых значений заданных координат x и y , причем в тонированной части каждой "клетки" размещены разности заданных и вычисленных x -координат, а в нетонированых — y -координат. Из данных, приведенных в табл. 3, следует, что разность заданных тестовых и вычисленных значений для *meth1* по координате y (Р3) не превышает 3,75 %, по координате x (осевое смещение) — 12 %, для *meth2* по y — не более 5,5 % (если не считать единичное значение разности около 10 %), а по x — менее 2,4 %.

По тем же семействам ГХ, полученным в динамике на лопатке Л2, проведены измерения на лопатках Л1 и Л3. Результаты измерений с использованием *meth2* показали, что Л1 сдвинута относительно Л2 по координате x примерно на 1 мм, а по координате y — около 0,8 мм в сторону увеличения. Тот факт, что Р3 Л1 больше по сравнению с Л2 также заметен и на рис. 9 по соотношению экстремальных значений кодов. Кроме того, как следует из рис. 9, отличие экстремальных значений кодов Л2 и Л3 настолько велико, что коды, соответствующие Л3, выходят за пределы семейства ГХ, полученного на Л2, и это может свидетельствовать о недопустимо большом Р3, позволяя диагностировать ненормальную ситуацию.

Заключение

Разработаны технические и программные средства системы, а также ее прототип. В состав техни-

⁶ Минимальный Р3 (0,8 мм) увеличен по соображениям безопасности, чтобы избежать касания ЧЭ ОВТД торцами лопаток на ИРК в процессе его вращения.

ческих средств системы входят ОВТД, ориентированные на применение в турбинах. В ОВТД, в свою очередь, введены дополнительные ТП для коррекции погрешности измерения температуры ЧЭ датчиков, а в устройстве предварительной обработки данных АЦП (на выходе ИЦ с приближенным дифференцированием) использован микроконтроллер. В состав ПО включены новые разработки, реализующие алгоритмы аддитивного сжатия данных, поиска экстремальных значений кодов или их вычисления при использовании аппроксимирующих функций, алгоритм вычисления x , y -координат, а также вспомогательные программы поддержки функционирования системы в двух режимах, реализующих *meth1* и *meth2* (по выбору пользователя).

Проведены экспериментальные исследования прототипа системы измерения для оценки метрологических показателей (в статическом режиме) и работоспособности системы (в динамике). Даны количественные оценки наиболее значимых показателей — систематической и случайной составляющих погрешности. Разработан и изготовлен имитатор объекта, который предназначен для оценки работоспособности аппаратно-программных средств системы, включая завершающую программу, реализующую алгоритм вычисления координат смещения торцов лопаток (x , y). Предложена методика такой оценки, предусматривающая ряд последовательных операций — получение ГХ с помощью имитатора объекта (в динамике, т.е. в процессе вращения ИРК), ввод табличных данных о ГХ (как исходных данных для расчета искомых координат), установку и ввод тестовых значений x , y -координат, а также их сравнение с полученными результатами вычислений тех же координат. Предложенная методика обеспечила вполне достоверную оценку работоспособности всех компонентов аппаратно-программных средств и системы в целом.

Список литературы

1. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. В., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Измерение радиальных зазоров между статором турбины и торцами лопаток сложной формы с помощью одновитковых вихревых датчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 38–46.
2. Беленский Л. Б., Кутейникова М. М., Логвинов А. В., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Устройство для измерения многокоординатных смещений торцов лопаток / Патент 2525614 РФ. 2014. Бюл. 23.
3. Беленский Л. Б., Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Технические средства и программное обеспечение системы измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы и скорости вращения лопаточного колеса // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. С. 655–662.
4. Белопухов В. Н., Боровик С. Ю. Алгоритм предварительной обработки данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. С. 646–649.
5. Белопухов В. Н., Боровик С. Ю. Алгоритм поиска экстремальных значений кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений лопаток сложной формы // Проблемы управ- ления и моделирования в сложных системах: Тр. XV Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2013. С. 650–654.
6. Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Способ измерения радиальных зазоров и осевых смещений торцов рабочих лопаток турбины / Патент 2556297 РФ. 2015. Бюл. № 19.
7. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Метод измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Автометрия. 2015. № 3. С. 104–112.
8. Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипинов П. Е., Райков Б. К., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Система измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток в газовоздушном тракте турбины // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVIII Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2016.
9. Беленский Л. Б., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Способ уменьшения температурной погрешности измерения многокоординатных смещений торцов лопаток одновитковым вихревым преобразователем / Патент 2519844 РФ. 2014. Бюл. № 17.
10. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Погрешность измерения температуры чувствительного элемента одновиткового вихревого датчика в каналах термокоррекции системы сбора информации о многокоординатных смещениях торцов лопаток и метод ее уменьшения // Вестник СамГТУ, Сер. "Технические науки". 2012. № 3 (35). С. 43–49.
11. STM32F405xx, STM32F407xx: URL: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf> (дата обращения 06.06.2016).
12. Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М. Алгоритмы функционирования систем измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 4.
13. Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипинов П. Е. Предварительная обработка данных кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы на основе аддитивного алгоритма // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVII междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2015. С. 677–678.
14. Белопухов В. Н., Боровик С. Ю., Кутейникова М. М. Определение экстремума функции изменения кодов в системе измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XVII междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2015. С. 679–680.
15. Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н. Алгоритм вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. XII Междунар. конф. Самара: Изд-во СамНЦ РАН. 2010. С. 323–327.
16. Кутейникова М. М. Вычисление координат смещения торцов лопаток в системе измерения радиальных зазоров // Управление большими системами: Матер. X Всеросс. школы-конференции молодых ученых. Т. 3. Уфа: УГАТУ. 2013. С. 157–161.
17. Кластерные методы и средства измерения деформаций статора и координат смещений торцов лопаток и лопастей в газотурбинных двигателях / Под общ. ред. О. П. Скобелева. М.: Машиностроение, 2011. 298 с.
18. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014.
19. Методы и средства измерения многомерных перемещений элементов конструкций силовых установок / Под ред. Ю. Н. Секисова, О. П. Скобелева. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2001. 188 с.
20. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Погрешности алгоритма вычисления радиальных и осевых смещений торцов лопаток сложной формы в системах измерения радиальных зазоров в турбине // Вестник СамГТУ. Сер. "Технические науки". 2016. № 2.
21. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Подлипинов П. Е., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Моделирование процесса измерения радиальных и осевых смещений торцов рабочих лопаток сложной формы // Автометрия. 2015. № 5. С. 101–112.
22. Боровик С. Ю., Кутейникова М. М., Секисов Ю. Н., Скобелев О. П. Погрешности дискретизации в системах измерения радиальных и осевых смещений торцов лопаток рабочего колеса турбины // Вестник СамГТУ, Сер. "Технические науки". 2016. № 3.

Measurement of the Radial Clearances with a Heightened Sensitivity in an Extended Range of the Axial Displacements of the Turbine Engine Disk

V. N. Belopukhov, Researcher, bvnsm@mail.ru, **S. Yu. Borovik**, Leading Researcher, borovik@iccs.ru✉, **M. M. Kuteynikova**, Researcher, kuteynikova@iccs.ru,

P. E. Podlipnov, Junior Researcher, pepodlypnov@yandex.ru,

Yu. N. Sekisov, Head of Laboratory, sekisov@iccs.ru, **O. P. Skobelev**, Chief Researcher, borovik@iccs.ru, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, 443020, Russian Federation

Corresponding author: Borovik Sergey Yu., D. Sc. (Tech.), Leading Researcher, Institute for the Control of Complex Systems of Russian Academy of Sciences, Samara, 443020, Russian Federation, e-mail: borovik@iccs.ru

Received on July 21, 2016

Accepted on August 12, 2016

The article presents a description of the hard-and-software tools of the system for measurement of the complex shaped blade tips' radial clearances and axial displacements. The blades of a complex shape are used in modern and promising gas turbine engines. System's hardware consists of high-temperature single-coil eddy-current sensors with additional thermocouples for sensitive elements' temperature error correction and front-end data processing module with ADC at the output of the measurement circuit and a microcontroller. The system's software consists of operation algorithms of a new generation, which ensure an adaptive data compression, code samples' approximation and information values searching, calculation of x, y-coordinates of the blade tips' displacements and other service algorithms. Experimental research of the prototype of the measurement system was realized. The main aim of the research was to evaluate the metrological characteristics of the system's prototype in a static mode and its operativeness in a dynamic mode. The quantitative estimations of the most significant indexes, the methodical and random error fractions, were provided. An object simulator was developed. It was intended for evaluation of the operativeness of the measurement system's hard-and-software tools. The principles of such evaluation are offered. These principles ensure several step-by-step operations, such as obtaining of the calibration characteristics in the dynamic mode during a simulator wheel rotation; setting of them in the system memory as the initial data for the further target coordinates' calculation; setting of the test values of x, y-coordinates and their comparison with the previously calculated values.

Keywords: turbine, irregular shaped blades, radial clearances, axial displacements, eddy-current single-coil sensor, distributed cluster of sensors, measurement system, experimental results, metrological characteristics, operativeness evaluation

For citation:

Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P. Measurement of the Radial Clearances with a Heightened Sensitivity in an Extended Range of the Axial Displacements of the Turbine Engine Disk, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 246–256.

DOI: 10.17587/mau.18.246-256

References

1. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Raykov B. V., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Izmerenie radial'nykh zazorov mezhdu statorom turbiny i tortsami lopatok slozhnoy formy s pomoshch'yu odnovitkovykh vikhretokovykh datchikov* (Measuring of radial clearances between turbine stator and tips of blades with irregular shape by the instrumentality of single-coil eddy-current sensors), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 10, pp. 38–46 (in Russian).
2. **Belen'kiy L. B., Kuteynikova M. M., Logvinov A. V., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Ustroystvo dlya izmerenija mnogokoordinatnykh smeshcheniy tortsov lopatok* (The blade tips' multiaxis displacements measuring device), Patent 2525614 RF, 2014, Byul. 23 (in Russian).
3. **Belen'kiy L. B., Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Tekhnicheskie sredstva i programmnoe obespechenie sistemy izmerenija radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy i skorosti vrashcheniya lopatochnogo kolesa* (Hardware and software tools of the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements and a blade wheel rotation speed), *Proc. of XV Internat. Conf. (Samara, June, 25–28, 2013) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 655–662 (in Russian).
4. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu.** *Algoritm predvaritel'noy obrabotki dannykh kodov v sisteme izmerenija radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy* (Algorithm for preliminary data processing in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements), *Proc. of XV Internat. Conf. (Samara, June, 25–28, 2013) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 646–649 (in Russian).
5. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu.** *Algoritm poiska ekstremal'nykh znacheniy kodov v sisteme izmerenija radial'nykh i osevykh smeshcheniy* (Algorithm for finding extreme values of codes in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements), *Proc. of XV Internat. Conf. (Samara, June, 25–28, 2013) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 650–654 (in Russian).
6. **Kuteynikova M. M., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Sposob izmerenija radial'nykh zazorov i osevykh smeshcheniy tortsov rabochikh lopatok turbiny* (Method for measurement turbine blade tips' radial clearances and axial displacements), Patent 2556297 RF, 2015, Byul. № 19 (in Russian).
7. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Method for measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, May 2015, vol. 51, issue 3, pp. 302–309 (in Russian).
8. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E., Raykov B. K., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Sistema izmerenija radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok v gazovozdushnom trakte turbiny* (System for measuring radial and axial displacements of blade tips in turbine gas-air section), *Proc. of XVIII international conference (Samara, September, 20–25, 2016) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, 2016 (in Russian).
9. **Belen'kiy L. B., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Sposob umen'sheniya temperaturnoy pogreshnosti izmerenija mnogokoordinatnykh smeshcheniy tortsov lopatok odnovitkovym vikhretokovym preobrazovatelym* (Method for decreasing temperature error during measurement blade tips' multiaxis displacements by the means of single-coil eddy-current transducer), Patent 2519844 RF, 2014, Byul. № 17 (in Russian).
10. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Pogreshnost' izmerenija temperaturny chuvstvitel'nogo elementa odnovitkovogo vikhretokovogo datchika v kanalakh termokorrektsii sistemy sbora informatsii o mnogokoordinatnykh smeshcheniyakh tortsov lopatok i metod ee umen'sheniya* (Temperature measuring error of single-coil eddy-current sensor's sensitive element in thermo correction channels of system for data acquisition about blade tips' multi-axial displacements and method for it decreasing), *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2012, no. 3 (35), pp. 43–49 (in Russian).
11. **STM32F405xx, STM32F407xx:** URL: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>

12. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M.** *Algoritmy funktsionirovaniya sistem izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy* (Operation algorithms of systems for measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips), *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'*, 2016, no. 4 (in Russian).

13. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E.** *Predvaritel'naya obrabotka dannykh kodov v sisteme izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy na osnove adaptivnogo algoritma* (Preliminary data processing in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements on the base of adaptive algorithm), *Proc. of XVII international conference (Samara, June, 22–25, 2015) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 677–678 (in Russian).

14. **Belopukhov V. N., Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M.** *Oprelenie ekstremuma funktsii izmeneniya kodov v sisteme izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy* (Codes' function extremum calculation in the system for measuring of complex shaped blades tips' radial and axial displacements), *Proc. of XVII international conference (Samara, June, 22–25, 2015) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 679–680 (in Russian).

15. **Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N.** *Algoritm vychisleniya radial'nyx i osevyx smeshchenij tortcov lopatok* (The algorithm for calculation of blade tips radial clearances and axial displacements), *Proc. of XII international conference (Samara, June, 21–23, 2010) "Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh"*, pp. 323–327 (in Russian).

16. **Kuteynikova M. M.** *Vychislenie koordinat smeshcheniya tortsov lopatok v sisteme izmereniya radial'nykh zazorov* (Calculation of blade tips' displacements in system for radial clearances measurement), *Upravlenie bol'shimi sistemami: Materialy X Vserossiyskoy shkoly-konferentsii molodykh uchenykh*, vol. 3, Ufa, Publishing house of UGATU, 2013, pp. 157–161 (in Russian).

17. **Skobelev O. P.** ed. *Klasternye metody i sredstva izmereniya deformacij statora i koordinat smeshchenij tortcov lopatok i lopastej v gazoturbiny dvigateleyax* (Cluster methods and tools for measuring of stator deformations and coordinates of blade tips displacements in gas-turbine engines), Moscow, Mashinostroenie ("Mechanical engineering"), 2011, 298 p. (in Russian).

18. **RMG 29-2013 GSI.** *Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya* (Metrology. Basic terms and definitions), Moscow, Standart-inform, 2014 (in Russian).

19. **Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** ed. *Metody i sredstva izmereniya mnogomernykh peremeshchenij elementov konstrukcij silovyx ustrojstv* (Methods and tools for measuring of multi-dimensional displacements of power-plant constructional elements), Samara, Samarskij nauchnyj centr RAN (Samara scientific center of Russian academy of sciences), 2001, 188 p. (in Russian).

20. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Pogreshnosti algoritma vychisleniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok slozhnoy formy v sistemakh izmereniya radial'nykh zazorov v turbine* (Errors of calculation algorithm of radial and axial displacement of complex shaped blade tips in the systems for measurement radial clearances in turbine), *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2016, no. 2 (in Russian).

21. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Podlipnov P. E., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** Modeling the process of measuring radial and axial displacements of complex-shaped blade tips, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, September 2015, vol. 51, iss. 5, pp. 512–522.

22. **Borovik S. Yu., Kuteynikova M. M., Sekisov Yu. N., Skobelev O. P.** *Pogreshnosti diskretnizatsii v sistemakh izmereniya radial'nykh i osevykh smeshcheniy tortsov lopatok rabochego kolesa turbiny* (Sampling errors in the systems for measuring radial and axial displacements of blades tips of turbine wheel), *Vestnik SamGTU, Seriya "Tekhnicheskie nauki"*, 2016, no. 3 (in Russian).

УДК 53.083.9

DOI: 10.17587/mau.18.256-263

А. Ю. Будко¹, Ph. D., руководитель обр. программы

"Мехатроника и робототехника" ЮФУ, aptem_budko@mail.ru,

М. Ю. Медведев¹, д-р техн. наук, проф., зав. каф, medvmihal@sfedu.ru,

Р. Ю. Будко¹, аспирант института приборостроения и наноэлектроники ЮФУ, raisa-budko@yandex.ru,

П. В. Ивашин², Ph. D., начальник НИО-4 ТГУ, ivashinpv@rambler.ru,

А. Я. Твердохлебов², инженер НИО-4 ТГУ, andr.tverd@gmail.com,

Д. Н. Герасимов³, Ph. D., доц., gerasimovdn@mail.ru, **В. В. Рахманов⁴**, Ph. D., доц., rahmanov@inbox.ru,

¹Южный федеральный университет,

²Тольяттинский государственный университет,

³Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет

информационных технологий, механики и оптики,

⁴Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания по сигналу ионного тока¹

Рассматриваются вопросы контроля параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания и исследования сигнала электропроводности пламени. Предложен метод контроля параметров процесса сгорания на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока, отличающейся повышенной устойчивостью результатов расчета к возмущениям сигнала, происходящим в результате межциклических вариаций и флуктуаций процесса сгорания. Приведены результаты экспериментального исследования по оценке возможностей предложенного метода в сравнении с пьезокерамическим датчиком давления сгорания. Показана возможность высокоточного контроля максимального давления сгорания, углового положения пика давления и коэффициента избытка воздуха на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, процесс сгорания, электропроводность пламени, ионный ток, интегральная характеристика сигнала ионного тока, контроль параметров, угловое положение пика давления

¹ Работа выполнена при частичной поддержке:

1) гранта РФФИ "Новые методы анализа ионных токов как инструмент исследования и оптимизации работы ДВС" (теоретические исследования);

2) гранта ЮФУ "Теория и методы энергосберегающего управления распределенными системами генерации, транспортировки и потребления электроэнергии" (экспериментальные исследования).

Введение

Контроль параметров процесса сгорания в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) является актуальной задачей, поскольку позволяет проводить углубленные исследования физики и химии процессов в камере сгорания, совершенствовать системы управления посредством введения дополнительных обратных связей, выполнять бортовую диагностику и улучшать эксплуатационные показатели двигателей.

Процесс сгорания в ДВС имеет следующие предельные показатели: скорость нормального сгорания — 10...100 м/с; скорость детонационного сгорания — 1000...2200 м/с; изменение температуры за 1 рабочий такт — до 2500 °С; изменение давления за 1 рабочий такт — до 25 МПа; скорость изменения давления: 0,1...0,35 МПа/° угла поворота коленчатого вала (УПКВ); число рабочих тактов в секунду: 5...200 Гц. Такие экстремальные условия затрудняют прямой контроль параметров сгорания традиционными методами [1—5], поэтому наибольшее распространение на сегодняшний день получили косвенные методы измерения, не требующие прямого доступа в камеру сгорания. При этом расчет параметров процесса сгорания проводится по его косвенным показателям: скорости и ускорению вращения коленчатого вала, вибрациям агрегата, давлению двигателя на крепежные элементы [6—11]. Широко распространенным является метод оценки показателей по крутящему моменту на валу двигателя, например на основе тензометрических датчиков [12]. При своей простоте и доступности косвенные методы имеют высокую погрешность оценки параметров, обусловленную несовершенством математических моделей, описывающих взаимосвязь внешних характеристик ДВС и показателей процесса сгорания.

Отдельным классом бесконтактных методов контроля параметров сгорания в ДВС являются оптические методы исследования, к которым относятся: скоростная фотосъемка, теневой метод, метод Теллера, голография, метод лазер-доплеровского измерения скорости, УФ- и ИК-спектроскопия, методы лазерной спектроскопии и т.д. [13—16]. Несмотря на высокие показатели информативности и точности, такие методы могут применяться только на специальных стендовых двигателях с прозрачными частями, поскольку вывод излучения из камеры сгорания затруднен.

Наиболее точные результаты дают методы прямого контроля процесса сгорания [17—24]. Развитой технологией производства средств измерения давления сгорания является изготовление датчиков на основе пьезокерамики, благодаря чему такие датчики используются в качестве эталонных. В лучших серийных образцах погрешность измерения давления сгорания не превышает 1,5 % во всем динамическом диапазоне, однако такие датчики

инерционны, имеют малый ресурс и высокую стоимость [17—20].

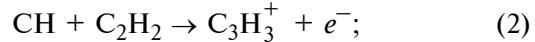
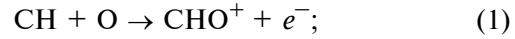
Перспективным направлением измерения давления сгорания является технология на основе оптоволоконных систем [20—24]. Принцип действия таких датчиков основан на законах преломления и отражения световых волн. При этом в конструкции чувствительного элемента используется механическая диафрагма, деформируемая под действием давления. Степень деформации измерительной мембранны отслеживается по изменению параметров светового пучка, отраженного от ее поверхности. Оптоволоконные датчики отличаются высокой стабильностью, помехоустойчивостью, высоким качеством сигнала, однако технология их изготовления на сегодняшний день отработана недостаточно.

Таким образом, существует реальная необходимость в инструменте измерения параметров процесса сгорания топливно-воздушной смеси, имеющего достаточную информативность и точность, высокую надежность и ресурс, а также низкую в сравнении с аналогами стоимость. Авторами статьи предлагается решение этой задачи на основе анализа сигнала электропроводности пламени.

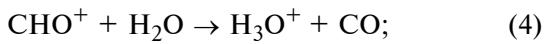
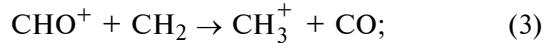
Электропроводность пламени и механизмы формирования ионного тока

Особенностью процесса сгорания углеводородных топлив является аномально высокая проводимость пламени. Главными механизмами образования заряженных частиц в пламени считаются химическая и термическая ионизация топливного заряда [2, 25—28]. Основные процессы, влияющие на ионизацию рабочего тела в камере сгорания ДВС, могут быть описаны следующими выражениями:

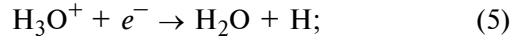
- химическая ионизация:



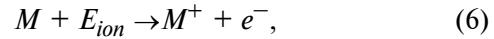
- перенос зарядов:



- рекомбинация ионов:



- термическая ионизация:



где M — главные группы оксидов азота NO.

Измерение ионного тока происходит посредством подачи высокого напряжения на измерительный зонд (например, центральный электрод свечи зажигания). Электродвижущая сила (ЭДС) приводит в движение заряженные частицы в районе электродов зонда, и в цепи начинает протекать ток. В качестве измерительного напряжения может

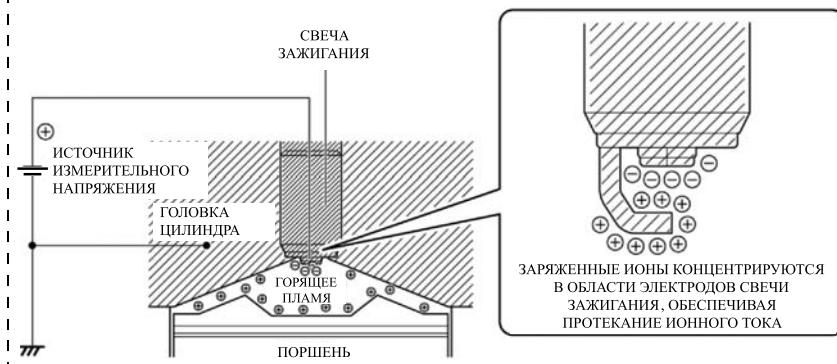


Рис. 1. Механизм образования ионного тока

применяться как постоянное, так и переменное напряжение. Наиболее распространены схемы с использованием постоянного напряжения с приложением к измерительному зонду положительному или отрицательному полюса источника питания [29–30]. При этом в литературе встречается описание схем с использованием измерительного напряжения потенциалом от 100 до 600 В. Механизм образования ионного тока поясняет рис. 1.

На практике силу ионного тока определяют по падению напряжения на измерительном шунте $R_{изм}$, как это показано на рис. 2.

Наиболее передовые системы регистрации ионного тока выполняют запись сигнала на жесткий носитель для проведения его дальнейшего анализа и обработки.

Современное состояние методов контроля параметров сгорания по сигналу ионного тока

Исследования в области использования ионизационных датчиков для контроля процесса сгорания в цилиндре ДВС проводят ведущие мировые производители ДВС и управляющей аппаратуры, такие как BOSCH, DELPHI, MECEL Mitsubishi Electric Corp. и др. Интерес к такому подходу объясняется следующими преимуществами: простота и дешевизна аппаратной части, безынерционность, широкий динамический диапазон, возможность оценки различных параметров процесса сгорания по одному сигналу.

Обзор литературы показал, что большинство известных методов анализа сигнала ионного тока (СИТ) основаны на поиске в сигнале признаков, характерных для различных доминирующих механизмов ионизации и фаз сгорания топливного заряда [25–30]. Можно выделить параметрический и структурный подходы к анализу СИТ. Параметрический анализ подразумевает оценку таких параметров СИТ, как число пиков и пиковые значения сигнала, время или угол от момента искрообразования до достижения этих значений, длительность сигнала, а также различные комбинации этих параметров. Пример параметрического анализа СИТ приведен на рис. 3.

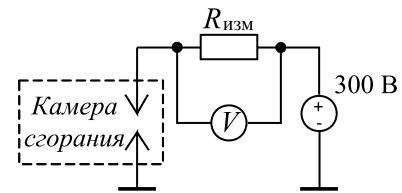


Рис. 2. Пример схемы измерения ионного тока: $R_{изм}$ — измерительный шунт, V — осциллограф для регистрации сигнала

Структурный анализ подразумевает разбиение целостного СИТ на более простые фигуры, аппроксимирующие характерные участки сигнала. Примером структурного анализа является метод определения углового положения пика давления (УППД) по пику термической ионизации, предложенный Lars Eriksson в 1999 г. [31] и впоследствии получивший развитие в работах других исследователей, например Z. Gao и др. в 2014 г. [32]. Для определения положения второго пика ионного тока для СИТ проводится процедура подбора параметров $[a \ b \ c]$ аппроксимирующего выражения (7):

$$\delta_1(t) = a_1 e^{\left(-\frac{(x-b_1)^2}{c_1}\right)} + a_2 e^{\left(-\frac{(x-b_2)^2}{c_2}\right)}, \quad (7)$$

где параметр a определяет максимальную амплитуду, b — местоположение максимума, c — ширину кривой Гаусса.

Выражение (7) описывает две кривых Гаусса, соответствующие первому и второму пикам СИТ, как это показано на рис. 4.

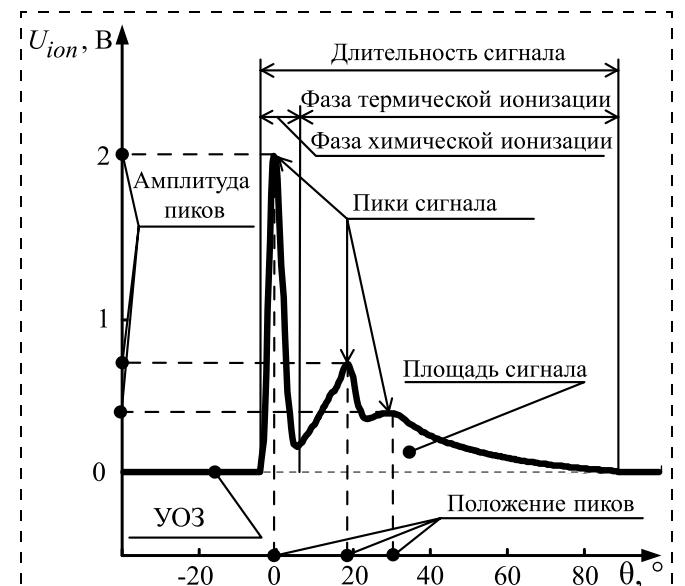


Рис. 3. Параметрический анализ сигнала ионного тока (УОЗ — угол опережения зажигания)

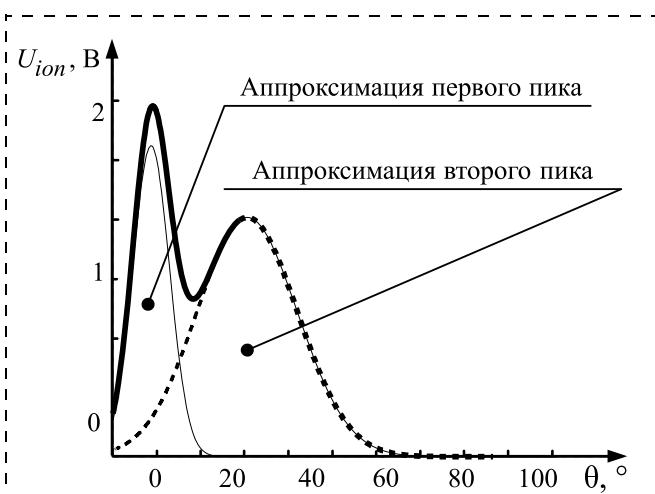


Рис. 4. Структурный анализ сигнала ионного тока

Методы параметрического и структурного анализа хорошо работают на установившихся режимах ДВС, когда имеется возможность усреднить сигнал по нескольким циклам однородной выборки. Однако при работе ДВС на переходных режимах возможность получения однородной выборки отсутствует, что приводит к значительному росту погрешностей расчета. Кроме того, сильная подверженность оцениваемых параметров СИТ межцикловым вариациям обуславливает наличие дополнительных недостатков, затрудняющих применение этих методов на практике [33]. Фазы СИТ могут накладываться друг на друга либо полностью отсутствовать в сигнале в явно выраженным виде, что приводит к невозможности выделения фаз сигнала по признакам доминирующего механизма ионизации. Другим недостатком структурного анализа является высокая ресурсоемкость.

Площадь под кривой СИТ является параметром, вычисление которого не накладывает на форму сигнала никаких ограничений. В литературе имеются сообщения о возможности использования этого параметра для оценки показателей работы и управления ДВС [34, 35]. При этом площадь рассчитывается как интеграл СИТ. Однако анализ самой кривой интегральной характеристики с учетом ее промежуточных расчетных значений, соответствующих различным моментам времени и фазам сгорания топливного заряда, ранее не проводили.

Разработка метода измерения параметров процесса сгорания на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока

Для минимизации ошибки измерения параметров сгорания во всем рабочем диапазоне работы ДВС авторами статьи был разработан метод на основе анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока (ИХСИТ).

Интегральная характеристика сигнала ионного тока рассчитывается методом пошагового интегри-

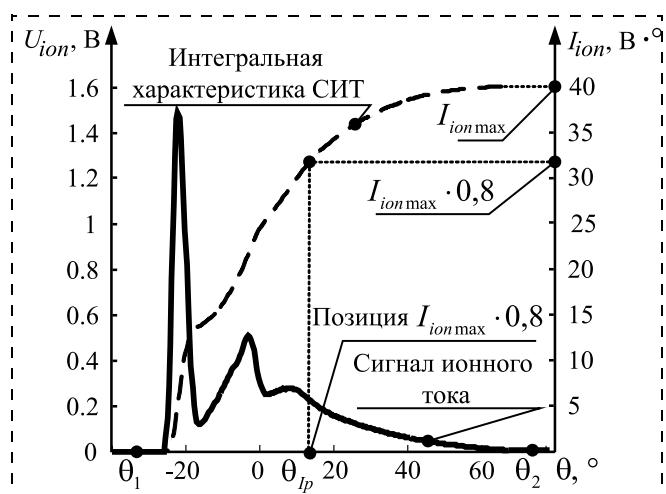


Рис. 5. К расчету интегральной характеристики сигнала ионного тока

рования СИТ по времени или УПКВ. Пределы интегрирования выбираются исходя из длительности существования сигнала после момента зажигания (см. θ_1 и θ_2 , рис. 5), что соответствует длительности процесса сгорания единичного рабочего такта двигателя:

$$I_{ion}(\theta) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} U_{ion}(\theta) d\theta, \quad (8)$$

где $I_{ion}(\theta)$ — интегральная характеристика ионного тока [$\text{В} \cdot ^\circ$]; θ — угол поворота коленчатого вала [$^\circ$]; θ_1 и θ_2 — пределы интегрирования [$^\circ$], $U_{ion}(\theta)$ — показания датчика ионизации [В].

Для вычисления интеграла могут быть использованы любые методы интегрирования. Примеры СИТ и его интегральной характеристики приведены на рис. 5.

На рис. 5 I_{ionmax} — максимальное значение интегральной характеристики, соответствующее площади под кривой СИТ. С этим параметром, характеризующим площадь под СИТ (или полный ток на зонд за единичный цикл сгорания топливного заряда в цилиндре ДВС), исследователи связывают понятие "интеграл ионного тока". Площадь под кривой СИТ является важным параметром, жестко связанным со многими показателями процесса сгорания, однако значительный интерес с точки зрения анализа рабочего процесса ДВС представляет также характер развития кривой ИХСИТ. Длительность $\theta_{ion} = \theta_2 - \theta_1$ СИТ соответствует длительности процесса сгорания, а I_{ionmax} характеризует энергетику процесса сгорания. Тогда комплексный анализ изменения промежуточных значений I_{ion} ИХСИТ в функции времени или УПКВ относительно I_{ionmax} позволяет определить характеристические фазы развития процесса сгорания. Далее будет показано, что момент θ_{lp} достижения 80...90 % I_{ionmax} соответствует окончанию основной фазы сгорания и достижению максимального значения давления в цилиндре.

Экспериментальная оценка метода контроля параметров сгорания ДВС по интегральной характеристике ионного тока

Основным преимуществом использования ИХСИТ является отсутствие ограничений на форму и параметры анализируемого СИТ. Это обеспечивает снижение режимных ограничений при анализе СИТ. Другим важным преимуществом является устойчивость результатов расчета к изменениям геометрических параметров электродов зонда в процессе эксплуатации ДВС, что иллюстрирует рис. 6, на котором представлены результаты расчета ИХСИТ для данных, приведенных в статье [36]. Авторы регистрировали СИТ для зондов различной площади на стационарных режимах работы ДВС и прочих равных условиях.

Анализ данных показывает, что изменение геометрических параметров электродов сильно влияет на форму СИТ и полный ток на зонд I_{ionmax} . Однако значения момента θ_{Ip} окончания основной фазы сгорания, рассчитанные по ИХСИТ, не имеют значительных вариаций.

Для оценки возможностей методов, основанных на анализе ИХСИТ, проведен ряд экспериментов на исследовательской установке УИТ-85 в Тольяттинском государственном университете. Экспериментальная установка подробно описана в статье [37].

В процессе эксперимента проводили регистрацию сигналов СИТ, давления сгорания (посред-

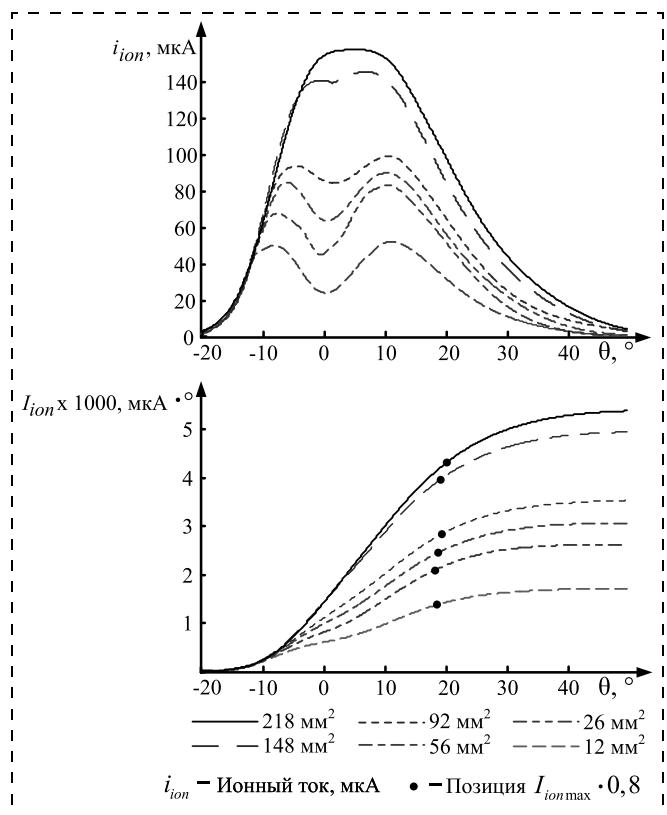


Рис. 6. Токи на зонд и результаты расчета окончания основной фазы сгорания по ИХСИТ при различных площадях электрода зонда

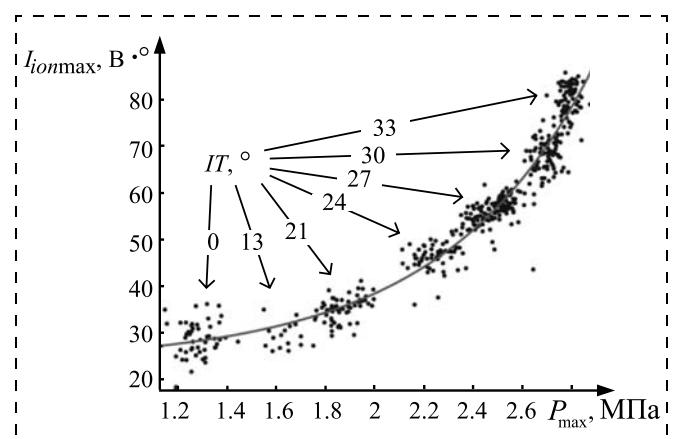


Рис. 8. Влияние УОЗ (ИТ) на максимальное давление цикла P_{max} и полный ток на зонд за цикл I_{ionmax}

ством пьезокерамического датчика), положения коленчатого вала и массового расхода воздуха на стационарных режимах работы. В первой серии опытов изменению подвергался угол опережения зажигания (УОЗ) при постоянстве других параметров, во второй варьируемым параметром являлся состав смеси. На рис. 7 (см. вторую сторону обложки) представлены усредненные осциллограммы СИТ и давления сгорания при различных УОЗ.

На основе полученных данных построена зависимость интеграла ионного тока и максимального давления цикла от УОЗ, приведенная на рис. 8.

Анализ зависимости, приведенной на рис. 8, указывает на возможность контроля максимального давления в цилиндре по ИХСИТ.

Характер изменения УППД, измеренного датчиком давления сгорания, и рассчитанного по ИХСИТ момента окончания основной фазы сгорания при изменении УОЗ можно оценить по данным, приведенным на рис. 9 (см. вторую сторону обложки).

Анализ данных рис. 9 показывает, что наименьший разброс расчетного УППД имеет место при больших УОЗ.

Зависимости среднего максимального давления цикла $P_{max}(\alpha)$ и интегрального значения СИТ $I_{max}(\alpha)$ от коэффициента избытка воздуха приведены на рис. 10.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 9, указывает на экстремальный характер с наличием максимума интегральной характеристики ионного тока в области $\alpha = 0,8 \dots 0,9$, что соответствует составу смеси, обеспечивающему максимальную энергиетику процесса сгорания, а именно максимальное давление сгорания и наивысшую скорость распространения пламени. Это позволяет использовать I_{ionmax} в качестве критерия оценки и оптимизации управляющих воздействий по коррекции α в случае оптимизации ДВС по максимальной мощности.

Результат сравнения эффективности методов расчета УППД по ИХСИТ и по пику тепловой ионизации в сравнении с эталонным значением

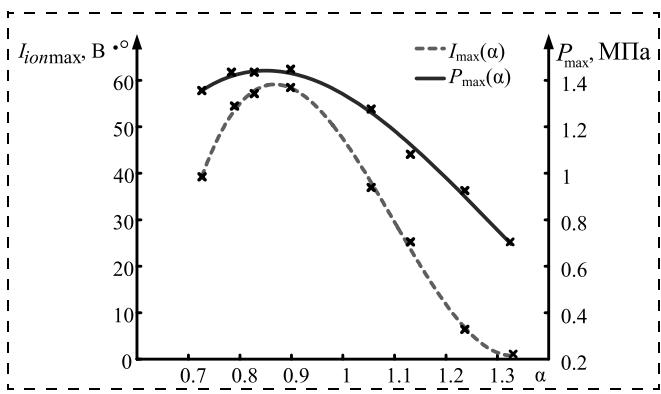


Рис. 10. Влияние коэффициента избытка воздуха на максимальное давление цикла и полный ток на зонд за цикл (значение I_{ionmax})

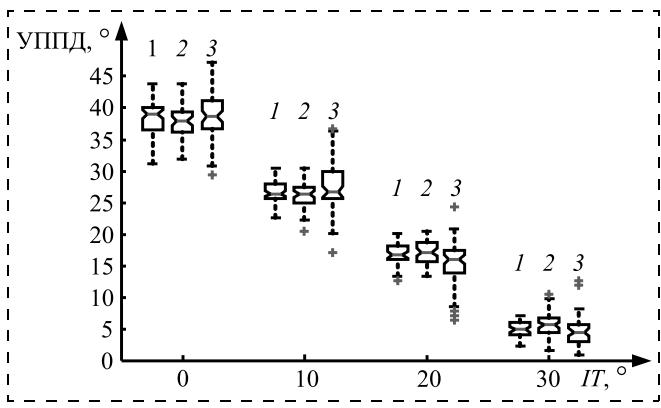


Рис. 11. Диаграммы размаха значений УППД для различных УЗД:

1 — датчик давления; 2 — интегральная характеристика сигнала ионного тока; 3 — пик тепловой ионизации ионного тока

пьезокерамического датчика давления приведен на рис. 11.

Анализ диаграмм размаха, приведенных на рис. 11, указывает на несущественные различия в вариациях УППД, оцененного по датчику давления и ИХСИТ, а также на меньшую подверженность ИХСИТ воздействию межцикловых вариаций параметров процесса сгорания по сравнению с пиком тепловой ионизации.

Заключение

Представлен метод контроля параметров процесса сгорания посредством анализа интегральной характеристики сигнала ионного тока. Предложенный метод позволяет проводить комплексный контроль параметров сгорания по единому сигналу ионного тока. При этом контролироваться могут такие параметры сгорания, как максимальное давление цикла сгорания, угловое положение пика давления, коэффициент избытка воздуха в топливной смеси. Приведены результаты экспериментальной проверки предложенного метода. Анализ экспериментальных данных указывает на высокую эффективность разработанного метода, сравнимую по точности и информативности с методами, осно-

ванными на применении дорогостоящих пьезокерамических датчиков давления сгорания.

Приведенные в статье положения и экспериментальные данные могут быть востребованы при решении задач исследования процесса сгорания, управления и оптимизации ДВС, а также диагностики двигателей.

Список литературы

1. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей // Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя. Москва — Свердловск: Машгиз, 1962. 271 с.
2. Соколик А. С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 428 с.
3. Соколик А. С. Основы теории нормального сгорания в двигателях с искровым зажиганием // Сгорание в транспортных поршневых двигателях. М.: АН СССР, 1951. С. 37—56.
4. Бровз Л. Д. Сгорание в поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1969. 345 с.
5. Воинов А. Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях. М.: Машиностроение, 1977. 277 с.
6. Технические средства диагностирования. Справочник. М.: Машиностроение, 1989. С. 330—378.
7. Галевко В. В., Гриб В. В., Шатров М. Г. Вибрационный контроль технического состояния ДВС и агрегатов автомобиля // Сб. трудов МАДИ (ГТУ). 2007. С. 287—289.
8. Кошкин В. Е., Луканин В. Н., Тольский В. Е. Методы измерения и экспериментального исследования шума и вибраций автомобильных двигателей. М.: НАМИ, 1961. 15 с.
9. Покусаев М. Н., Сибяев К. О., Шевченко А. В. Экспериментальное определение степени неравномерности вращения вала машинно-двигательного комплекса судна пр. 1557 // Вестник АГТУ. 2008. № 2 (43). С. 140—144.
10. Патент РФ № 5064974/06, 27.01.1996. Прягунов А. И. Способ оценки неравномерности работы цилиндров двигателя внутреннего сгорания // Патент России № 2053491. 1996.
11. Вибрация энергетических машин. Справ. пособ. / Под ред. д-ра техн. наук проф. Н. В. Григорьева. Л.: Машиностроение, 1974. 434 с.
12. Гуринов А. С., Дудник В. В., Гапонов В. Л., Калашников В. В. Измерение крутящего момента на вращающихся валах // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4. URL: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798/>.
13. Климин В. Ф., Папырин А. Н., Солоухин Р. И. Оптические методы регистрации быстропротекающих процессов. Новосибирск: Наука, 1980. 205 с.
14. Гиль В. В. Оптические методы исследования процессов горения. Минск: Наука и техника, 1984. 126 с.
15. Reuss G. L. Combust and Flame. 1983. V. 49. N. 1—3. P. 207—219.
16. Eckbreth A. C., Sirignano W. A. Laser diagnostics for combustion temperature and species // Combustion science and technology book series 1996. Vol. 3.
17. Frederic A. Matekunas. Engine combustion control with ignition timing by pressure ratio management // SAE paper No. 1622939. 1986. P. 54—67.
18. Hubbard M., Dobson P. D., Powell J. D. Closed loop control of spark advance using a cylinder pressure sensor. Journal of Dynamic Systems // Measurement and Control. 1976. P. 414—420.
19. Powell J. D. Engine Control Using Cylinder Pressure: Past, Present, and Future // ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 1993. Vol. 115. pp. 343—350.
20. Measuring Spark Plug with Integrated Cylinder Pressure Sensor. URL: www.kistler.com/mediaaccess/000-697e-08.11.pdf
21. Overview of Fiber Optic Sensors. URL: www.bluerr.com/papers/Overview of FOS2.pdf
22. Соколов А. Н., Яцеев В. А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы // IGBTWAVE Russian Edition. 2006. № 4. С. 42—44.
23. Pressure measuring spark plug and sensor. URL: www.optrand.com/fliers/psi plug/20060201.pdf
24. Белоусов Е. В., Савчук В. П., Штанько А. Д. Опыт создания оптоволоконных датчиков для индикации рабочего

процесса двигателей // Грузовик & Строительно-дорожные машины, автобус, троллейбус, трамвай. 2007. № 12. С. 87–91.

25. **Satzkoff A., Reinmann R., and Berglind T.** An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor. SAE paper 960337, 1996.

26. **Calcote H. F.** Ion and electron profiles in ames // 9th Symposium (International) on Combustion, 1963

27. **Eriksson L., Nielson L.** Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines // Cont. Eng. Prac. 1997. 5 (8). P. 1107–1113.

28. **Yoshiyama S., Tomita E., Mori M., Sato Y.** Ion current in a homogeneous charge compression ignition engine // SAE paper 2007-01-4052, 2007.

29. **Ивашин П. В., Рамазанов М. П., Твердохлебов А. Я., Шайкин А. П.** О возможности оценки работы цикла двигателя внутреннего сгорания ионизационным зондом // Вектор науки ТГУ. 2012. № 4 (22). С. 165–168.

30. **Будко А. Ю.** Методы исследования и оптимизации процессов горения топливно-воздушной смеси в двигателях внутреннего сгорания. Дисс. ... канд. техн. наук, ЮФУ, г. Таганрог-г. Ростов-на-Дону, 2016, 149 с.

31. **Lars Eriksson.** Spark Advance Modeling and Control // SE-581 83 Linkoping, 1999.

32. **Gao Z.** et al. 2014. The correlation between the cylinder pressure and the ion current fitted with a Gaussian algorithm for a spark ignition engine fuelled with natural-gas–hydrogen blends // Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering.

33. **Axel Franke.** Characterization of an Electrical Sensor for Combustion Diagnostics // Doctoral Thesis / Lund Reports on Combustion Physics, LRCP-80, 2002.

34. **Kaiadi M.** et al. 2008. Closed-Loop Combustion Control Using Ion-Current Signals in a 6-Cylinder Port-Injected Natural-gas Engine. SAE 2008-01-2453.

35. **Zheng S.** et al. 2014. Study on cycle-by-cycle variations of ion current integral and pressure in spark ignition engine // International conference on electronic and mechanical engineering and information technology, Harbin, Heilongjiang, People's Republic of China, 12–14 August 2011, New York: IEEE. P. 3404–3407.

36. **Wu X.** et al. 2008. Experimental investigation of the effect of electrodes on the ionization current during combustion // Energy and Fuels. 2008. N. 22. P. 2941–2947.

37. **Ясиников И. С., Ивашин П. В., Шайкин А. П.** К вопросу о турбулентном распространении пламени в замкнутом объеме // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, Вып. 11. С. 39–43.

Control of the Combustion Process Parameters in ICE by the Ion Current Signals

A. Yu. Budko, aptem_budko@mail.ru✉, **M. Yu. Medvedev**, medvmihal@sfedu.ru,
R. Yu. Budko, raisa-budko@yandex.ru,
 Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation,
P. V. Ivashin, ivashinpv@rambler.ru, **A. Ya. Tverdokhlebov**, andr.tverd@gmail.com,
 Togliatti State University, Togliatti, 445020, Russian Federation,
D. N. Gerasimov, gerasimovdn@mail.ru,
 ITMO University, St. Petersburg, 190000, Russian Federation,
V. V. Rakhmanov, rahmanov@inbox.ru,
 Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Corresponding author: Budko Artem Yu., Ph. D., Head of the Mechatronics and Robotics Educational Program of the Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344006, Russian Federation, e-mail: aptem_budko@mail.ru

Received on November, 02, 2016

Accepted on November, 21, 2016

This paper is devoted to control of the combustion processes in the internal combustion engines (ICE). It presents a method for estimation of the position of the peak pressure, the maximal pressure of the cycle and the air-fuel ratio based on the analysis of the integral characteristics of the ion current signals. The advantages of the proposed method are stability of the final result of the calculation to the influence from the cycle-to-cycle combustion parameter variations, stability to the changes in the parameters of the measuring probe during a long operation time and absence of restrictions on the wave form of the ion current. It also presents the results of the experimental testing of the developed method and its comparison with the conventional methods of analysis of the ion current and control of the combustion process parameters. The authors compared the efficiency and accuracy of the method using a combustion pressure sensor, based on the piezoelectric ceramics; the methods of the ion current analysis, based on detection of the thermal-ionization ion current peak; the method of the ion current analysis based on the integral characteristic of the ion current signal. The results of the experimental studies indicate a possibility of the use of the integral characteristic of the ion current signal for estimation of the combustion process parameters with the accuracy of the combustion pressure sensor based on the piezoelectric ceramics. The ion current measurement technology is cheaper than the piezoelectric ceramic sensors and can be widely applied in the serial engines.

Keywords: internal combustion engine, combustion process, electrical conductivity of the flame, ion current integral characteristic of an ion current signal, control parameters, angular position of the peak pressure

Acknowledgement: This work was partly supported by:

- 1) RFBR Grant "New methods of analysis of the ionic currents as a research tool, and optimization of operation of the internal combustion engines" (theoretical studies);
- 2) SFU grant "Theory and methods of the energy-saving control systems with the distributed generation, transmission and consumption of electricity" (experimental studies).

For citation:

Budko A. Yu., Medvedev M. Yu., Budko R. Yu., Ivashin P. V., Tverdokhlebov A. Ya., Gerasimov D. N., Rakhmanov V. V. Control of the Combustion Process Parameters in ICE by the Ion Current Signals, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 256–263.

DOI: 10.17587/mau.18.256-263

References

1. **Vibe I. I.** *Novoe o rabochem cikle dvigatelej* [The new about on the engine cycle work], Moskva-Sverdlovsk, Mashgiz, 1962, 271 p. (in Russian).
2. **Sokolik A. C.** Samovosplamenenie, plamja i detonacija v gazah [Self-ignition flame and detonation in gases], Moscow, Publishing house of AS USSR, 1960, 428 p. (in Russian).
3. **Sokolik A. C.** *Osnovy teorii normal'nogo sgoranija v dvigateljakh s iskrovym zazhiganiem* [The foundations of the theory of normal combustion engines with spark ignition], *Sgoranie v transportnyh porshnevyh dvigateljakh*, Moscow, Publishing house of AS USSR, 1951, pp. 37–56 (in Russian).
4. **Broze L. D.** *Sgoranie v porshnevyh dvigateljakh* [The combustion in piston engines], Moscow, Mashinostroenie, 1969, 345 p. (in Russian).
5. **Voinov A. N.** *Sgoranie v bystrohodnyh porshnevyh dvigateljakh* [The combustion in the high-speed piston engines], Moscow, Mashinostroenie, 1977, 277 p. (in Russian).
6. **Tehnickeskie sredstva diagnostirovaniya** [hardware diagnostics], Moscow, Mashinostroenie, 1989, pp. 330–378 (in Russian).
7. **Galevko V. V., Grib V. V., Shatrov M. G.** *Vibroakusticheskiy kontrol' tehnicheskogo sostojaniya DVS i agregatov avtomobilja* [Vibro-acoustic monitoring of the technical condition of the engine and vehicle units], *Works MADI (GTU)*, 2007, pp. 287–289 (in Russian).
8. **Koshkin V. E., Lukin V. N., Tol'skij V. E.** *Metody izmerenija i jekspertimental'nogo issledovanija shuma i vibracij avtomobil'nyh dvigatelej* [Methods for measuring noise and experimental research and automotive engine vibration], Moscow, NAMI, 1961, 15 p. (in Russian).
9. **Pokusaev M. N., Sibrjaev K. O., Shevchenko A. V.** *Jekspertimental'noe opredelenie stepeni neravnomernosti vrashhenija vala mashinno-dvizhitel'nogo kompleksa sudna* [Experimental determination of the degree of non-uniformity of rotation of the machine complex ship], *Vestnik AGTU*, 2008, vol. 2 (43), pp. 140–144 (in Russian).
10. **Prygunov A. I.** *Sposob ocenki neravnomernosti raboty cilindrov dvigatela vnutrennego sgoranija* [A method of evaluating nonuniformity of the internal combustion engine cylinders], Patent RF № 2053491, 1996 (in Russian).
11. **Grigor'ev N. V.** ed. *Vibracija jenergeticheskikh mashin* [Vibration energy machines], Leningrad, Mashinostroenie, 1974, 434 p. (in Russian).
12. **Gurinov A. S., Dudnik V. V., Gaponov V. L., Kalashnikov V. V.** *Izmerenie krutjashhego momenta na vrashhajushchih valah* [Torque measurement on rotating shafts], *Inzhenernyj Vestnik Doma*, 2016, vol. 4, available at: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/798>.
13. **Klimkin V. F., Papyrin A. N., Solouhin R. I.** *Opticheskie metody registracii bystropotekajushchih processov* [Optical methods for recording fast processes], Novosibirsk, Science, 1980, 205 p. (in Russian).
14. **Gil' V. V.** *Opticheskie metody issledovanija processov gorenija* [Optical methods for studying combustion processes], Minsk, Nauka i Tekhnika, 1984, 126 p. (in Russian).
15. **Reuss G. L.** *Combust and Flame*, 1983, vol. 49, no. 1–3, pp. 207–219.
16. **Eckbreth A. C., Sirignano W. A.** Laser diagnostics for combustion temperature and species, *Combustion Science and Technology Book Series*, vol. 3, Gordon and Breach, 1996.
17. **Matekunas F. A.** Engine combustion control with ignition timing by pressure ratio management, SAE paper no. 1622939, 1986. pp. 54–67.
18. **Hubbard M., Dobson P. D., Powell J. D.** Closed loop control of spark advance using a cylinder pressure sensor, *Journal of Dynamic Systems. Measurement and Control*, 1976, pp. 414–420.
19. **Powell J. D.** Engine Control Using Cylinder Pressure: Past, Present, and Future, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1993, vol. 115, pp. 343–350.
20. **Measuring** Spark Plug with Integrated Cylinder Pressure Sensor, available at: www.kistler.com/mediaaccess/000-697e-08.11.pdf.
21. **Overview** of Fiber Optic Sensors, available at: www.bluerr.com/papers/Overview of FOS2.pdf.
22. **Sokolov A. N., Yatseev V. A.** *Volokonno-opticheskie datchiki i sistemy: printsyipy postroeniya, vozmozhnosti i perspektivy* [Fiber Optic Sensors and Systems: principles of construction, opportunities and prospects], IGBTWAVE Russian Edition, 2006, vol.4, pp. 42–44 (in Russian).
23. **Pressure** measuring spark plug and sensor. available at: www.optrand.com/fliers/psi plug/20060201.pdf.
24. **Belousov E. V., Savchuk V. P., Shtanko A. D.** Experience of fiber optic sensors for indexing the workflow engine. *Truck & Building and road machines, bus, trolley bus, tram*, 2007, vol. 12, pp. 87–91.
25. **Satzkoff A., Reinmann R., Berglind T.** An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor, SAE paper 960337, 1996.
26. **Calcote H. F.** Ion and electron profiles in ames, *9th Symposium (International) on Combustion*, 1963.
27. **Eriksson L., Nielson L.** Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines, *Cont. Eng. Prac.*, 1997, 5 (8), pp. 1107–1113.
28. **Yoshiyama S., Tomita E., Mori M., Sato Y.** Ion current in a homogeneous charge compression ignition engine, SAE paper 2007-01-4052, 2007.
29. **Iavashin P. V., Ramazanov M. P., Tverdokhlebov A. Ya., Shaykin A. P.** *O vozmozhnosti otsenki raboty tsikla dvigatelya vnutrennego sgoraniya ionizatsionnym zondom* [Possibility of evaluation of the internal combustion engine cycle ionization probe], *Vektor Nauki TGU*, 2012, vol. 4 (22), pp. 165–168 (in Russian).
30. **Budko A. Yu.** *Metody issledovaniya i optimizatsii protsessov gorenija toplivno-vozdushnoy smesi v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Methods of research and optimization of combustion of the fuel-air mixture for internal combustion engines], Publishing house of SFEDU, Taganrog — Rostov-on-Don, 2016, 149 p. (in Russian).
31. **Lars Eriksson.** *Spark Advance Modeling and Control.* SE-581 83 Linkoping, 1999.
32. **Gao Z.** et al. The correlation between the cylinder pressure and the ion current fitted with a Gaussian algorithm for a spark ignition engine fuelled with natural-gas–hydrogen blends, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2014.
33. **Axel Franke.** Characterization of an Electrical Sensor for Combustion Diagnostics. Doctoral Thesis. Lund Reports on Combustion Physics, LRCP-80, 2002.
34. **Kaiadi M.** et al. 2008. Closed-Loop Combustion Control Using Ion-Current Signals in a 6-Cylinder Port-Injected Natural-gas Engine. SAE 2008-01-2453.
35. **Zheng S.** et al. Study on cycle-by-cycle variations of ion current integral and pressure in spark ignition engine. Inter-national conference on electronic and mechanical engineering and information technology, Harbin, Heilongjiang, People's Republic of China, 12–14 August 2011, New York, IEEE, 2014, pp. 3404–3407.
36. **Wu X.** et al. 2008, Experimental investigation of the effect of electrodes on the ionization current during combustion. *Energy and Fuels*, 2008, vol. 22, pp. 2941–2947.
37. **Yasnikov I. S., Iavashin P. V., Shaykin A. P.** *K voprosu o turbulentnom rasprostranenii plameni v zamknutom ob'eme* [On the question of the turbulent flame propagation in a confined space], *Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki*, 2013, vol. 83, iss. 11, pp. 39–43 (in Russian).

С. В. Алилуев¹, ведущий конструктор, s.v.aliluev@kbra.ru,
А. А. Большаков², д-р техн. наук, проф., aabolshakov57@gmail.com,

А. Н. Попов¹, ген. директор, pilot@kbra.ru,

Д. П. Тетерин¹, д-р техн. наук, зам. ген. директора по науке, tdp@kbra.ru,

¹ АО "Конструкторское бюро промышленной автоматики", г. Саратов,

² Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)

Методики и алгоритмы контроля и диагностики привода системы управления автономного подвижного аппарата

Обоснованы экстремальные требования к средствам контроля технического состояния и диагностики отказов электропневматического рулевого привода с гидравлическим тормозом автономного подводного аппарата. С использованием методов системного анализа осуществлена декомпозиция требований до уровня функций средств контроля и диагностики рулевого привода. Разработаны методики и алгоритмы контроля и диагностики привода, комплект технологической контрольно-преврочечной аппаратуры.

Ключевые слова: электропневматический рулевой привод, рулевой привод, автономный подводный аппарат, элементы системы управления

Введение

Развитие человечества в текущем тысячелетии во многом связано с освоением пространства и ресурсов Мирового океана. Для эффективного обеспечения национальных интересов Российской Федерации [1] необходимо создание эффективных средств исследования морских и океанических акваторий, к которым относятся в том числе автономные подводные аппараты (АПА). Эксплуатационные характеристики и эффективность таких аппаратов непосредственно зависят от технического состояния приводов органов управления АПА, которое необходимо контролировать на всех стадиях жизненного цикла приводов и подводного аппарата [2]. Для традиционных конструктивных исполнений электромеханических, электропневматических и электрогидравлических рулевых приводов (РП) разработаны и успешно используются методики и алгоритмы контроля и диагностики технического состояния. Появление высокоскоростных АПА привело к созданию гибридного (комбинированного) РП — электропневматического привода с гидравлическим тормозом [3, 4]. Это

обуславливает необходимость разработки соответствующих методик, алгоритмов и программно-аппаратных решений для контроля и диагностики подобных РП при создании и эксплуатации АПА.

Постановка задачи

Рассматривается автономный необитаемый подводный аппарат, который перемещается в воде на глубине до 30 м со скоростями более 100 км/ч. Управление АПА осуществляется двумя парами рулей, которые в зависимости от режима движения аппарата занимают относительно корпуса положение от 0 до 90°. Изменение положения каждого руля осуществляется электропневматический привод с гидравлическим тормозом (рис. 1). Требуется разработать методики и программно-аппаратные средства контроля текущего технического состояния и диагностики отказов РП в условиях проектирования, серийного производства и эксплуатации.

Задачу предлагается решать в соответствии со следующими этапами:

1. Обосновать требования и сформировать техническое задание на разработку технологического оборудования, реализующего методики и алгоритмы контроля и диагностики РП при создании контрольно-преврочечной аппаратуры (КПА).

2. Выполнить декомпозицию экстремальных требований к КПА до уровня функций контроля и диагностики РП в условиях серийного производства и эксплуатации АПА. На основе сформулированных экстремальных функций контроля и диагностики РП определить перечень методик контроля и диагностики, которые необходимо разработать.

3. Разработать методики, алгоритмы контроля и диагностики РП.

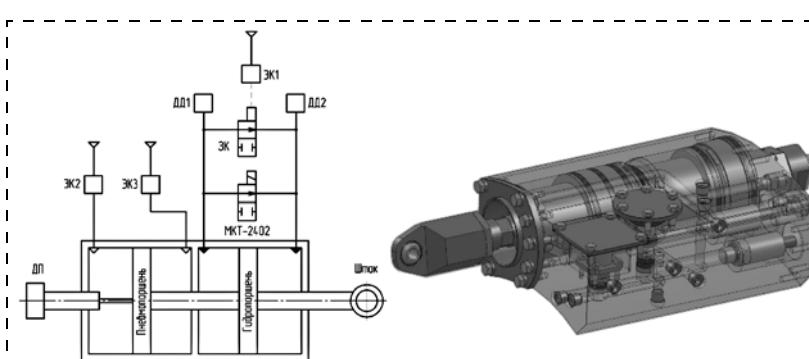


Рис. 1. Электропневматический привод с гидравлическим тормозом:
ДД1, ДД2 — датчики давления, ДП — датчик положения, ЗК, ЭК1, ЭК2, ЭК3, МКТ-2402 — электромагнитные клапаны

4. Разработать и изготовить КПА.

5. Выполнить отработку (апробирование) разработанных методик и алгоритмов средствами КПА.

Обоснование требований к КПА

Для обоснования требований к КПА (рис. 2) использован метод системного анализа средств моделирования сложных технических систем — номенклатурного нормирования [5].

В соответствии с данным методом формирование требований к КПА осуществляется в несколько этапов:

1. По логической формуле определяются общая цель создания аппаратуры $\Pi_0 = (\Pi_u \cup \Pi_n \cup X \cup \neg B) \cap B = \text{"Контроль технического состояния и диагностика отказов АПА"}$, а также подцели, определяющие функции КПА, $\Pi_1 = \text{"Контроль технического состояния электропневматического привода с гидравлическим тормозом"}$ и $\Pi_2 = \text{"Диагностика отказов электропневматического привода с гидравлическим тормозом"}$ (обозначения соответствуют рис. 2).

2. Формируются подмножества условий эксплуатации АПА-РП (Y_u), экстремальных условий (Y_n) и специфических условий (Y_c), а также множество ситуаций применения АПА-РП по соотношению $C = \{C_1, C_2, \dots\} \subset (Y_u \times Y_n \times Y_c)$. Здесь ситуациями описываются возможные варианты, в которых планируется использовать РП [6].

Формирование множества ситуаций осуществляется табличным методом синтеза ситуаций (упрощенный фрагмент показан в табл. 1).

Элементарные составляющие требований анализируются на совместимость и другие отношения

Таблица 1
Элементарные составляющие требований

Обозначение		Формулировка требования
Y_u	Y_1	Максимальная глубина погружения h м
	Y_2	Пониженная температура среды -60°C
	Y_3	Относительная влажность среды 100 %
Y_n	Y_4	Крейсерская скорость движения до $V \text{ км/ч}$
Y_c	Y_5	Движение в двухфазной среде (жидкость—газ)

Таблица 2
Матрица отношений на произведении ($Y_u \times Y_n \times Y_c$)

Обозначение	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5
Y_1	0	0	1	0	0
Y_2	0	0	0	0	0
Y_3	1	0	0	1	0
Y_4	0	0	1	0	1
Y_5	0	0	0	1	0

между ними. Результаты анализа записываются в клетках, находящихся на пересечении строк и столбцов. Несовместимые пары элементарных составляющих требований помечаются цифрой "0", совместимые — цифрой "1" или логическим символом связи между ними (табл. 2).

Для приведенного примера имеем $C = \{Y_1 \times Y_3, Y_3 \times Y_4, Y_4 \times Y_5\}$.

При числе условий достижения целей проектирования более пяти целесообразно выполнять многократный анализ множества ситуаций на прямом произведении ($C \times C$) и для сокращения по-

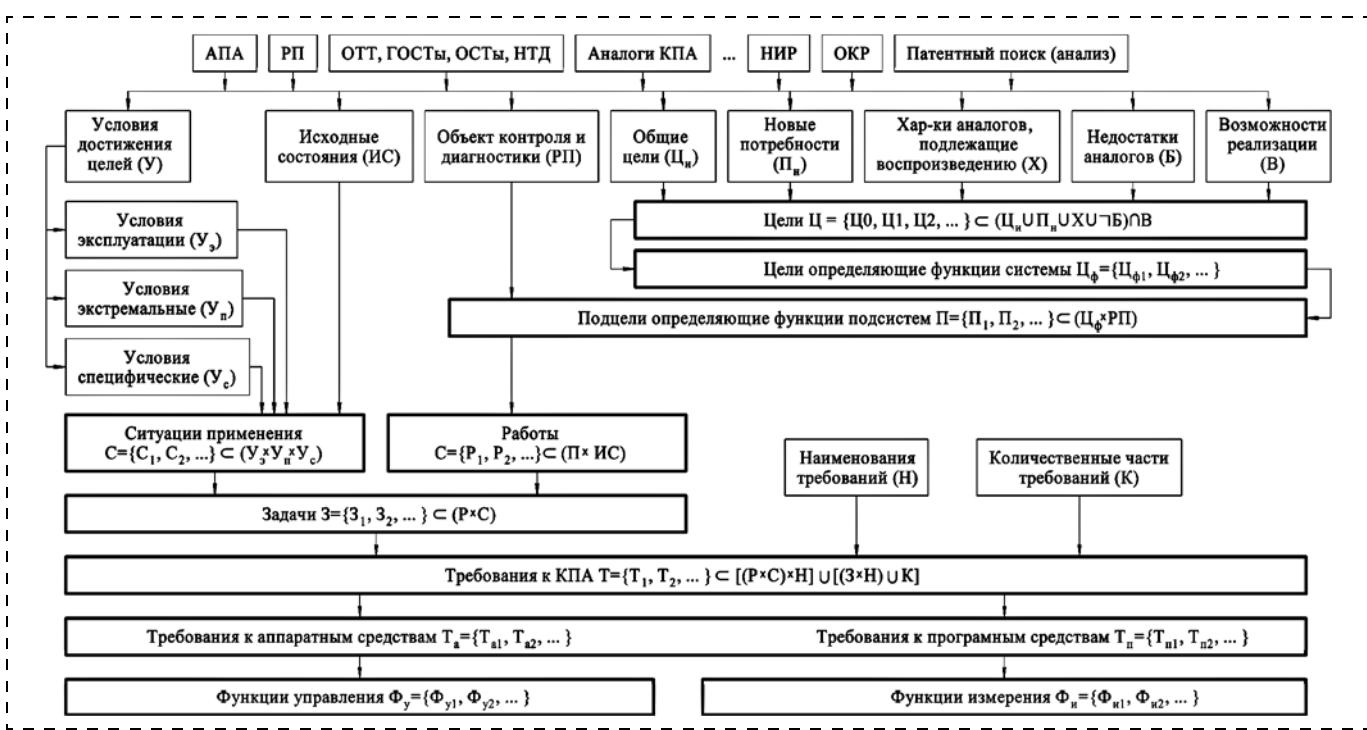


Рис. 2. Порядок обоснования требований к КПА

рядка решаемой задачи выбирать только наиболее неблагоприятные ситуации применения.

Например, для рассматриваемого примера $C_1 = (Y_4 \times Y_5) = \text{"Крейсерская скорость движения до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)"}$.

Полученные ситуации воспроизводятся (имитируются) КПА в условиях проектирования, серийного производства и эксплуатации РП и АПА.

3. Табличным способом определяются множества задач, выполняемых технологическим оборудованием $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\} \subset (P \times C)$, где $P \subset (P \times IC)$:

$Z_1 = \text{"Контроль технического состояния электропневматического привода с гидравлическим тормозом при полном угле раскрытия и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)}";$

$Z_2 = \text{"Контроль технического состояния электропневматического привода с гидравлическим тормозом при фиксации рулей относительно корпуса АПА в промежуточном положении и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)}";$

$Z_3 = \text{"Диагностика отказов электропневматического привода с гидравлическим тормозом при полном угле раскрытия и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)}";$

$Z_4 = \text{"Диагностика отказов электропневматического привода с гидравлическим тормозом при фиксации рулей относительно корпуса АПА в промежуточном положении и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)}".$

4. Формулируются требования к КПА $T = \{T_1, T_2, \dots\}$, которые необходимо включить в техническое задание на разработку КПА (рис. 3).

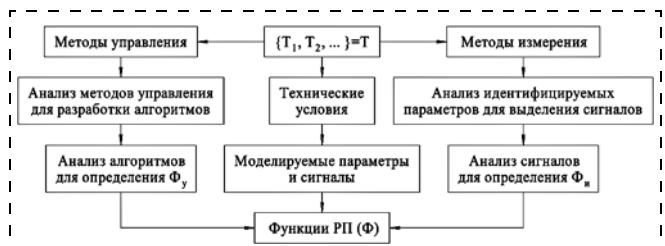


Рис. 3. Порядок перехода от множества T к множеству Φ

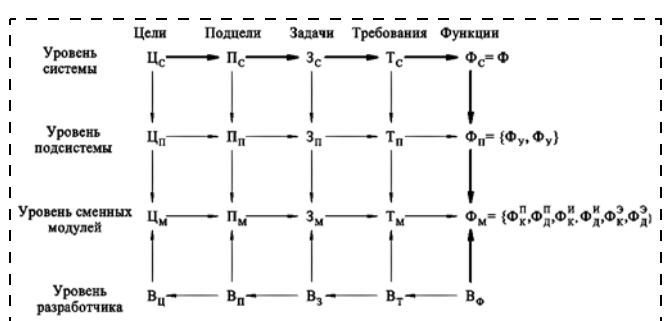


Рис. 4. Иерархия требований к КПА

Например, $T_1 = \text{"Глубина контроля технического состояния электропневматического привода с гидравлическим тормозом при фиксации рулей относительно корпуса АПА в промежуточном положении и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ)} — до сменного модуля", T_2 = \text{"Диагностика отказов электропневматического привода с гидравлическим тормозом при фиксации рулей относительно корпуса АПА в промежуточном положении и имитации движения АПА на крейсерской скорости до } V \text{ км/ч в двухфазной среде (жидкость—газ) за время не более } t \text{ с}."$

Декомпозиция требований до уровня функций

Декомпозиция множества требований T до уровня функций контроля и диагностики привода Φ выполняется согласно рис. 3: $\Phi_y = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5\}$, где $\Phi_1 = \text{"Выдача команды в АПА на перемещение рулей", } \Phi_2 = \text{"Выдача команды в АПА на фиксацию рулей", } \Phi_3 = \text{"Формирование усилия на рулях от } 0 \text{ до } (g \pm \Delta) \text{ кг", } \Phi_4 = \text{"Контроль технического состояния сменных модулей РП", } \Phi_5 = \text{"Диагностики отказов модулей РП"; } \Phi_i = \{\Phi_6, \Phi_7, \Phi_8, \Phi_9\}$, где $\Phi_6 = \text{"Измерение усилия на рулях", } \Phi_7 = \text{"Измерение угла раскрытия рулей относительно продольной оси АПА", } \Phi_8 = \text{"Измерение времени перемещения рулей", } \Phi_9 = = \text{"Измерение времени поиска отказавшего модуля РП".}$

Далее множества Φ_y и Φ_i подвергаются декомпозиции (рис. 4) до уровня функций контроля и диагностики сменных модулей РП с учетом возможностей их реализации разработчиком КПА (B_Φ) в условиях проектирования, производства и эксплуатации $\Phi_m = \{\Phi_k^п, \Phi_d^п, \Phi_k^и, \Phi_d^и, \Phi_k^з, \Phi_d^з\}$, где, например, $\Phi_k^п = \{\Phi_{k1}^п = \text{"Контроль плавности хода штока РП при максимальном усилии на руле при проведении предварительных испытаний", } \Phi_{k2}^п, \dots\}$, $\Phi_d^п = \{\Phi_{d1}^п = \text{"Диагностика отказов запорного клапана ЗК при проведении приемо-сдаточных испытаний", } \Phi_{d2}^п, \dots\}$, $\Phi_k^и = \{\Phi_{k1}^и = \text{"Контроль показаний датчика положения ДП на различных углах раскрытия рулей при максимальном усилии на руле при проведении регламентных работ (технического обслуживания)", } \Phi_{k2}^и, \dots\}$.

Методики, алгоритмы контроля и диагностики

На следующем этапе осуществляется переход от функций контроля и диагностики сменных модулей РП к перечню методик контроля и диагностики РП и далее к алгоритмам их реализации [7]:

а) алгоритму контроля плавности хода штока, работоспособности гидравлического замка, скорости перемещения штока, скорости раскрытия рулей при имитации внешней нагрузки, удержания

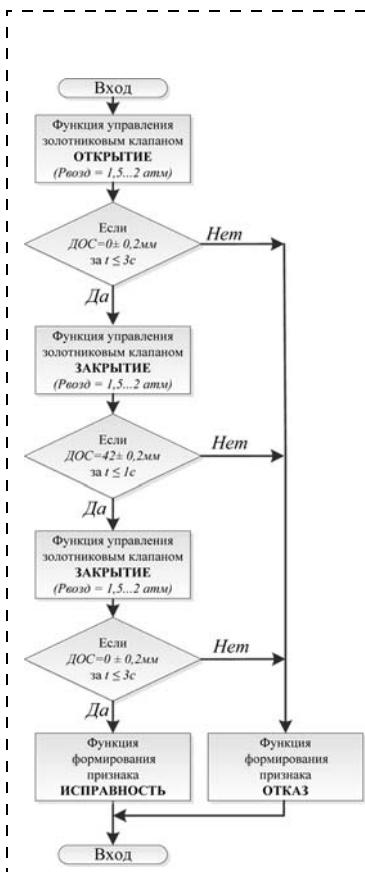


Рис. 5. Блок-схема алгоритма контроля плавности хода штока

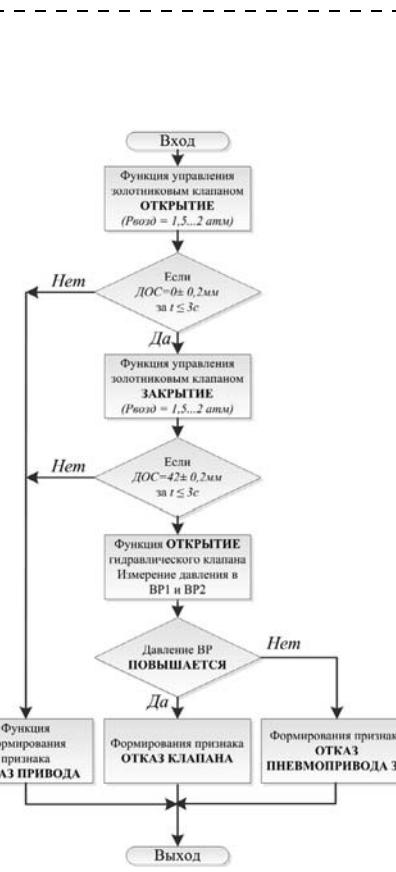


Рис. 6. Блок-схема алгоритма диагностики отказов клапана с пневмоприводом ЗК

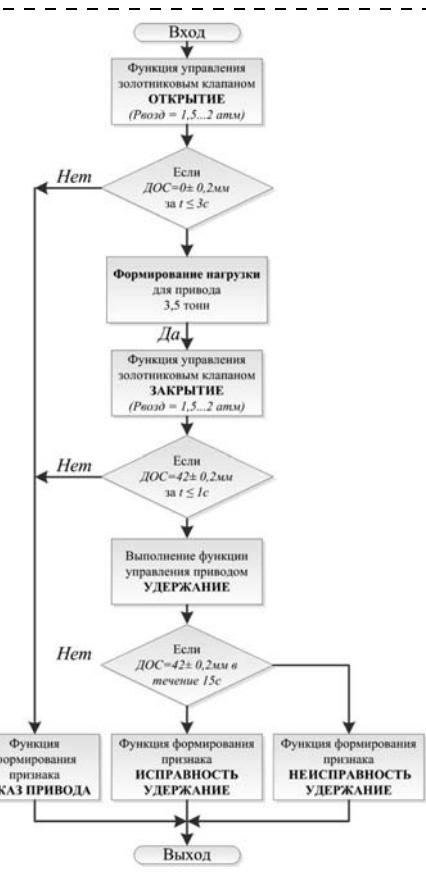


Рис. 7. Блок-схема алгоритма контроля удержания РП

привода в заданных диапазонах нагрузки на различных углах раскрытия рулей, удержания привода при номинальной нагрузке и полном раскрытии рулей и др.;

б) алгоритму диагностики отказов стравливающих электромагнитных клапанов ЭК2 и ЭК3, клапана с пневмоприводом ЗК, электромагнитного клапана МКТ-2402, датчика положения ДП, датчиков давления ДД1 и ДД2 и др.

Например, методика контроля плавности хода штока РП включает следующие действия согласно блок-схеме алгоритма, представленной на рис. 5: установить руль АПА в исходное (нулевое) положение — руль сложенный; электромагнитные клапаны: ЗК — открыть; ЭК2 — открыть (устанавливается давление, равное 1 атм); ЭК3 — закрыть; на вход электромагнитного клапана ЭК3 подать сжатый воздух под давлением 1,5...2 атм; электромагнитный клапан ЭК3 открыть; измерить время от момента открытия клапана ЭК3 до момента получения информации от датчика перемещения ДП об изменении положения штока РП более чем на 42 мм; если время раскрытия рулей более 0,5 с и менее 1 с, то сформировать сообщение об исправности РП, иначе сформировать сообщение о наличии признаков отказа РП; электромагнитные клапаны: ЭК2 — закрыть; ЭК3 — открыть (устанавливается давление, равное 1 атм); на вход элек-

тромагнитного клапана ЭК2 подать сжатый воздух под давлением 1,5...2 атм; электромагнитный клапан ЭК2 открыть; измерить время от момента открытия клапана ЭК2 до момента получения информации от датчика перемещения ДП об изменении положения штока РП менее чем на 5 мм; если время закрытия рулей более 0,5 с и менее 3 с, то сформировать сообщение об исправности РП, иначе сформировать сообщение о наличии признаков отказа РП.

Блок-схемы алгоритмов диагностики отказов клапана с пневмоприводом ЗК, контроля удержания РП, диагностики датчика положения (ДП) представлены на рис. 6—8 соответственно.

Разработка и изготовление технологического оборудования

На основании технического задания на разработку КПА с учетом общих технических требований (ОТТ), государственных стандартов (ГОСТ), отраслевых стандартов (ОСТ) и прочей нормативной документации (НТД) выполнены:

- синтез множества вариантов реализации конструкции аппаратуры [8];
- многокритериальный выбор эффективных вариантов реализации аппаратуры в зависимости

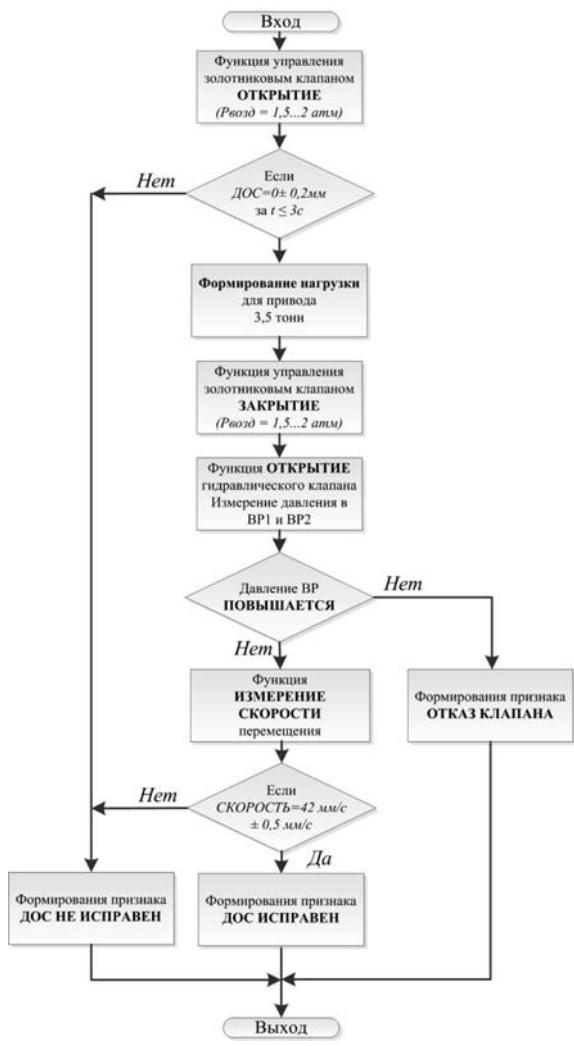


Рис. 8. Блок-схема алгоритма диагностики датчика положения ДП

от условий применения (при проектировании, серийном производстве и в эксплуатации) [8];

- расчет основных технических характеристик;
- определение принципов функционирования КПА;
- проектирование, изготовление, проверка соответствия КПА [9] требованиям технического задания и ввод в эксплуатацию (рис. 9, см вторую сторону обложки).

Заключение

Предложен подход к обоснованию требований к средствам контроля технического состояния и диагностики отказов электропневматического рулевого привода с гидравлическим тормозом автономного подводного аппарата. С использованием методов системного анализа осуществлена декомпозиция экстремальных требований до уровня

функций средств контроля и диагностики РП. Разработаны методики и алгоритмы контроля и диагностики привода, комплект технологической контрольно-проверочной аппаратуры. Новизна предложенного в статье подхода к разработке методик и алгоритмов контроля и диагностики РП АПА [10] заключается в следующем:

- формализация процесса обоснования требований по назначению КПА, переход от требований к функциям аппаратуры и далее к методикам и алгоритмам контроля и диагностики РП, что позволяет снизить вероятность принятия ошибочных решений на стадии создания аппаратуры, которые являются наиболее частыми и приводят к значительному увеличению стоимости и сроков НИОКР;
- разработка технологического оборудования, методик и алгоритмов контроля технического состояния и диагностики отказов нового типа гибридных приводов — электропневматического привода с гидравлическим тормозом.

Список литературы

1. О стратегии национальной безопасности Российской Федерации до 2020 года. Указ Президента РФ от 12.05.2009 года № 537.
2. Новоселов Б. В., Николаев В. Я. Концепция разработки, построения и эффективного использования сервисных средств следящих приводов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 11. С. 47–52.
3. Алилуев А. В., Алилуев С. В., Гаранин И. В., Говоренко Г. С., Петербург А. И., Поршинев В. А., Тетерин Д. П., Фирсов В. М., Яшин А. Г. Пневмогидравлический привод. Патент на изобретение RU № 114738 F15B11/072. от 23.12.2011.
4. Алилуев С. В., Балашов А. Л., Поршинев В. А., Тетерин Д. П. Процедура выбора рулевого привода органов управления автономного подводного аппарата // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 1 (2). С. 140–144.
5. Тетерин Д. П. Синтез требований к бортовому информационно-измерительному и моделирующему комплексу // Информационно-управляющие системы. 2009. № 1 (38). С. 10–14.
6. Костин А. В., Мягких А. С., Подураев Ю. В., Яковлев С. Ф. Методика определения основных электромеханических параметров прямого линейного электропривода // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 10. С. 27–31.
7. Быстров Л. Г., Попов А. А., Тетерин Д. П. Методика оценки работоспособности элементов бортовых систем управления летательных аппаратов в условиях произвольных входных возмущающих воздействий // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 12. С. 56–61.
8. Сафонов В. В., Северов А. А., Тетерин Д. П. Выбор наилучшего варианта системы подготовки и пуска летательных аппаратов на основе метода гипервекторного ранжирования // Вестник воздушно-космической обороны. 2015. № 2 (6). С. 99–104.
9. Герман-Галкин С. Г., Загашвили Ю. В. Энергосберегающие стенды для комплексных испытаний электроприводов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 2. С. 39–44.
10. Кушнерик А. А., Михайлов Д. Н., Сергеенко Н. С., Щербатюк А. Ф., Гой В. А., Туфанов И. Е., Дубровин Ф. С. Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необходимые подводный и водный аппараты // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 3. С. 67–72.

Methods and Algorithms for Control and Diagnostics of the Steering Gear of the Autonomous Underwater Vehicles

S. V. Aliluev¹, s.v.aliluev@kbpa.ru, **A. A. Bolshakov²**, aabolshakov57@gmail.com✉, **A. N. Popov¹**, pilot@kbpa.ru, **D. P. Teterin¹**, tdp@kbpa.ru,

¹Design Bureau of Industrial Automation Co., Saratov, 41005, Russian Federation

²St. Petersburg State Technological Institute (Technical University), St. Petersburg 190013, Russian Federation

Corresponding author: Bolshakov Aleksandr A., Professor of the Computer Aided Design and Management Department, St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 190013, St. Petersburg, Russia, Moskovsky pr. 26, e-mail: aabolshakov57@gmail.com

Received on November 11, 2016

Accepted on November 23, 2016

An approach is proposed for substantiation of the requirements for the use of the means of control of a technical state and diagnostics of failures of the electro-pneumatic steering gear with a hydraulic brake for the autonomous underwater vehicles. The extreme requirements are based on the use and means of control of a technical state and diagnostics of failures of the electro-pneumatic steering gear with a hydraulic brake for the autonomous underwater vehicles. Using the methods of the system analysis, a decomposition of the extreme requirements up to the level of the control functions and diagnostics of the steering gear was carried out. The methods and algorithms for control and diagnostics of the steering gear, a set of technological control and test equipment were developed. The novelty of the developed methods and algorithms for the control and diagnostics of the steering gear of the autonomous underwater vehicles is related to the formalization of the process of justification of the requirements to the use of the autonomous underwater vehicles, with transition from the requirements to the functions of the devices and, further, to the methods and algorithms of control and diagnostics of the steering gear. This allows us to reduce the probability of making wrong decisions at the stage of development of the equipment, which are the most frequent and lead to a significant increase of the cost and time of the research and development, and also create the technological equipment, methods and algorithms for control of the technical state and diagnostics of failures of a new type of the hybrid actuators — the electropneumatic steering gear with a hydraulic brake. For testing of the proposed approach an autonomous unmanned underwater vehicle, which moves in water at a depth up to 30 m with velocities over 100 km per hour, was considered. The control of the autonomous underwater vehicle is performed by two pairs of rudders, which, depending on the driving mode of the device, take position from 0 to 90 degrees relative to the vehicle hull.

Keywords: electropneumatic steering gear, steering gear, autonomous underwater vehicle, control system components

For citation:

Aliluev S. V., Bolshakov A. A., Popov A. N., Teterin D. P. Methods and Algorithms for Control and Diagnostics of the Steering Gear of the Autonomous Underwater Vehicles, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 264–269.

DOI: 10.17587/mau.18.264-269

References

1. Russian national security strategy until 2020. *Presidential Decree* of 12.05.2009, the number 537 (in Russian).
2. Novoselov B. V., Nikolaev V. Y. Concept development, construction and efficient use of service tools servo drives, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 11, pp. 47–52 (in Russian).
3. Aliluev A. V., Aliluev S. V., Garanin I. V., Govorenko G. S., Petersburg A. I., Pistons V. A., Teterin D. P., Firsov V. M., Yashin A. G. Pneumohydraulic drive, *Patent for invention RU* number 114738 F15B11/072, from 23.12.2011 (in Russian).
4. Aliluev S. V., Balashov A. L., Pistons V. A., Teterin D. P. Steering gear selection procedure bodies councils-ment of autonomous underwater vehicle, *Bulletin of Samara Scientific Center of the*

Russian Academy of Sciences, 2016, no. 1 (2), vol. 18, pp. 140–144 (in Russian).

5. Teterin D. P. Synthesis of the requirements to the onboard information and measuring and modeling complex, *Informationally-Control Systems*, 2009, no. 1 (38), pp. 10–14 (in Russian).

6. Kostin A. V., Myagkikh A. S., Poduraev Y. V., Yakovlev S. F. Methods of determining the basic parameters of electromechanical linear actuator direct, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2013, no. 10, pp. 27–31 (in Russian).

7. Bystrov L. G., Popov A. A., Teterin D. P. Methods of evaluation of the work-ability of the elements onboard aircraft control systems under arbitrary input disturbances, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 12, pp. 56–61 (in Russian).

8. Safronov V. V., North A. A., Teterin D. P. Choosing the best all-rianta system of training and start-up of aircraft based on the method of ranking gipervektornogo, *Herald of Aerospace Defense*, 2015, no. 2 (6), pp. 99–104 (in Russian).

9. German-Galkin S. G., Zagashvili Y. V. Energy stands for the complex testing of electric drives, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 2, pp. 39–44 (in Russian).

10. Kushnerik A. A., Kushner-Rick A. A., Mikhailov D. N., Sergeenko N. S. et al. Maritime robotic system, turn-conductive autonomous unmanned underwater vehicles and water, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 3, pp. 67–72 (in Russian).

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖУЩИМИСЯ ОБЪЕКТАМИ

УДК 629.73.018.7

DOI: 10.17587/mau.18.270-278

О. Н. Корсун, д-р техн. наук, нач. лаб., проф., marmotto@rambler.ru,

Государственный НИИ авиационных систем, г. Москва,

С. В. Николаев, ст. инж.-испытатель, nikozavr@mail.ru,

Государственный летно-испытательный центр им В. П. Чкалова, г. Ахтубинск,

Б. К. Поплавский, д-р техн. наук, нач. лаб., проф., boris.poplavsky2001@yandex.ru,

Летно-испытательный институт им. М. М. Громова, г. Жуковский

Алгоритмы проверки правильности полетных данных и оценивания нелинейностей при идентификации аэродинамических коэффициентов самолетов¹

Рассматривается алгоритмическое и методическое обеспечение задач контроля правильности бортовых измерений и оценивания нелинейных аэродинамических зависимостей при выполнении идентификации аэродинамических коэффициентов самолетов по данным летных испытаний. Представлены примеры практического применения рассмотренных методов и алгоритмов в процессе идентификации параметров математических моделей нескольких современных самолетов.

Ключевые слова: идентификация параметров математических моделей самолетов, летные испытания, аэродинамические коэффициенты, проверка согласованности бортовых измерений

Введение

Работа посвящена актуальной проблеме алгоритмического и методического обеспечения идентификации аэродинамических коэффициентов летательных аппаратов (ЛА) по данным летных испытаний. В настоящее время в этой области имеется значительный задел. Так, принципиальные подходы определены в работах [1–2], основные этапы технологии идентификации изложены в статьях [3–5], алгоритмы идентификации представлены в работах [6–9], примеры использования в процессе летных испытаний приведены в статьях [10–12]. Однако задача совершенствования методов идентификации по-прежнему сохраняет актуальность. Главная трудность заключается в том, что при идентификации ЛА имеют место несоответствия между принятыми допущениями о структуре моделей объекта и бортовой системы измерений и регистрации, а также о статистических свойствах шумов. Это вызывает смещения оценок параметров [13]. В работе [14] для уменьшения этого эффекта предложено специальным образом подбирать входные сигналы на участке идентификации. Однако идентификация аэродинамических коэффициентов ЛА — это комплексная задача, при решении которой следует применять широкий спектр приемов: декомпозицию общей задачи на ряд более простых, оценку достоверности резуль-

татов путем сопоставления данных из разных источников, использование достоверных результатов из смежных дисциплин [13]. В данной работе рассматривается применение указанных приемов для решения наиболее сложных задач обработки данных летного эксперимента, к которым относятся проверка правильности бортовых измерений и идентификация нелинейных аэродинамических зависимостей. При этом большое внимание уделяется форме представления результатов, поскольку в задаче идентификации учет характеристик оператора, наглядность и удобство восприятия результатов существенно повышают вероятность их правильной интерпретации [15–16].

Математическая модель пространственного движения

В задаче идентификации аэродинамических коэффициентов самолетов наиболее достоверным и точным результатом являются общие уравнения пространственного движения, полученные непосредственно из основных законов механики. Распространенные в динамике полета упрощенные варианты моделей движения [17] в данном случае применять нецелесообразно, поскольку возникающие при этом погрешности могут непрогнозируемым образом повлиять на оценки идентификации. Поэтому возьмем достаточно полную нелинейную систему дифференциальных уравнений, в которой учитывается центробежный момент инерции I_{xy} и ис-

¹ Работа поддержана РФФИ, проект 15-08-06237-а.

пользуется допущение о том, что самолет имеет плоскость симметрии [17]:

$$\begin{aligned}
 \frac{da}{dt} &= \omega_z - \frac{1}{\cos\beta} \left[\left(\frac{a_x}{V} - \omega_y \sin\beta \right) \sin\alpha + \right. \\
 &+ \left. \left(\frac{a_y}{V} - \omega_x \sin\beta \right) \cos\alpha \right]; \\
 \frac{d\beta}{dt} &= \frac{a_z}{V} \cos\beta - \left(\frac{a_x}{V} \sin\beta - \omega_y \right) \cos\alpha + \\
 &+ \left(\frac{a_y}{V} \sin\beta + \omega_x \right) \sin\alpha; \\
 \frac{dV}{dt} &= a_x \cos\alpha \cos\beta - a_y \sin\alpha \cos\beta + a_z \sin\beta; \\
 \frac{d\omega_z}{dt} &= \frac{I_x - I_y}{I_z} \omega_x \omega_y + q \frac{Sb_A}{I_z} m_z - \frac{k_{\text{дв}} \omega_y}{I_z} - \\
 &- \frac{(P_{\text{пр}} + P_{\text{лев}}) y_{\text{дв}}}{I_z} + \frac{I_{xy} (\omega_x^2 - \omega_y^2)}{I_z}, \\
 \frac{d\omega_y}{dt} &= \frac{I_x (I_z - I_x) - I_{xy}^2}{I_x I_y - I_{xy}^2} \omega_x \omega_z + \frac{k_{\text{дв}} \omega_z I_x}{I_x I_y - I_{xy}^2} + \\
 &+ \frac{(P_{\text{пр}} - P_{\text{лев}}) z_{\text{дв}} I_x}{I_x I_y - I_{xy}^2} - \frac{I_{xy} (I_z - I_x - I_y)}{I_x I_y - I_{xy}^2} \omega_y \omega_z + \\
 &+ \frac{I_x q S I m_y + I_{xy} q S I m_x}{I_x I_y - I_{xy}^2}; \\
 \frac{d\omega_x}{dt} &= \frac{I_y (I_y - I_z) + I_{xy}^2}{I_x I_y - I_{xy}^2} \omega_y \omega_z - \frac{I_{xy} (I_y + I_x - I_z)}{I_x I_y - I_{xy}^2} \omega_x \omega_z + \\
 &+ \frac{I_y q S I m_x + I_{xy} q S I m_y}{I_x I_y - I_{xy}^2} + \frac{I_{xy} (k_{\text{дв}} \omega_z + (P_{\text{пр}} - P_{\text{лев}}) z_{\text{дв}})}{I_x I_y - I_{xy}^2}, \\
 \frac{d\vartheta}{dt} &= \omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma; \\
 \frac{dy}{dt} &= \omega_x - \operatorname{tg}\vartheta (\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma); \\
 \frac{d\psi}{dt} &= \frac{1}{\cos\vartheta} (\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma); \\
 \frac{dH}{dt} &= I [\cos\alpha \cos\beta \sin\vartheta - \sin\alpha \cos\beta \cos\vartheta \cos\gamma - \\
 &- \sin\beta \cos\vartheta \sin\gamma].
 \end{aligned} \tag{1}$$

Ускорения вдоль связанных осей:

$$\begin{aligned}
 a_x &= \frac{qS(-c_x + c_p)}{m} - g \sin\vartheta = g(n_x - \sin\vartheta); \\
 a_y &= \frac{qSc_y}{m} + g \cos\vartheta \sin\gamma = g(n_z + \cos\vartheta \cos\gamma); \\
 a_z &= \frac{qSc_z}{m} + g \cos\vartheta \sin\gamma = g(n_x + \cos\vartheta \sin\gamma).
 \end{aligned} \tag{2}$$

Перегрузки вдоль связанных осей:

$$\begin{aligned}
 n_x &= \frac{qS(-c_x + c_p)}{gm} = \frac{a_x}{g} + \sin\vartheta; \\
 n_y &= \frac{qSc_y}{gm} = \frac{a_y}{g} + \cos\vartheta \cos\gamma; \\
 n_z &= \frac{qSc_z}{gm} = \frac{a_z}{g} - \cos\vartheta \sin\gamma.
 \end{aligned} \tag{3}$$

Здесь и далее используются следующие обозначения:

α, β — углы атаки и скольжения, рад; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — угловые скорости относительно связанных осей, рад/с; ϑ, γ, ψ — углы тангажа, крена, рыскания, рад; V — скорость полета, м/с; H — высота полета, м; m_x, m_y, m_z — коэффициенты аэродинамических моментов; c_x, c_y, c_z — коэффициенты аэродинамических сил в связанный системе координат; I_x, I_y, I_z, I_{xy} — моменты инерции относительно связанных осей в связанный системе координат, кг·м²; m — масса самолета, кг; l, b_A — размах крыла и длина средней аэродинамической хорды, м; S — эквивалентная площадь крыла, м²; $q = \rho_H V^2/2$ — скорость напор, Па; ρ_H — плотность воздуха на высоте полета, кг/м³; $c_p = (P_{\text{пр}} + P_{\text{лев}})/qS$ — коэффициент тяги двигателей; $P_{\text{пр}}, P_{\text{лев}}$ — сила тяги правого и левого двигателей, Н; $k_{\text{дв}}$ — кинетический момент роторов двигателей, кг·м²; $y_{\text{дв}}, z_{\text{дв}}$ — координаты двигателя в связанный системе координат, м.

На основе системы дифференциальных уравнений (1) с учетом соотношений (2) и (3) несложно построить модель для проверки согласованности бортовых измерений, а также модели для идентификации продольного и бокового движений. При этом двойные равенства (2) и (3), в зависимости от задачи, позволяют выражать ускорения через аэродинамические коэффициенты или перегрузки и углы ориентации, перегрузки — через аэродинамические коэффициенты и т.д.

Алгоритм проверки согласованности бортовых измерений

При решении задач идентификации важна высокая точность бортовых измерений параметров полета. Погрешности системы бортовых измерений и регистрации определяются не только инструментальными погрешностями [18] применяемых датчиков, но и характером аэродинамического обтекания в местах установки датчиков, координатами установки датчиков, положением центра масс самолета, длиной и конструкцией трубопроводов системы воздушных сигналов, а также зависят от режима полета и вида маневра. Современные цифровые системы регистрации, в свою очередь, вносят дополнительные погрешности, среди которых наиболее значимыми обычно являются сдвиги по времени, обусловленные неточной синхронизацией информационных потоков. В летных испытаниях оценивание систематических погрешностей бортовых

вых аэрометрических измерений является одним из важных разделов, который выполняется по специальным методикам [19–23]. Однако комплексную проверку правильности полетных данных следует считать необходимым этапом, что подтверждается как имеющимся опытом [24–25], так и представленными ниже примерами. Погрешности бортовых измерений являются, в первую очередь, динамическими и связаны с движением самолета. Потому для их детектирования и коррекции используем рассмотренные выше уравнения (1).

Из общей модели (1) пространственного движения самолета выделим уравнения, определяющие основные параметры полета (углы атаки, скольжения, тангла, крена и скорость полета) и имеющие вид

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{dt} &= \omega_z - \frac{1}{\cos\beta} \left[\left(\frac{a_x}{V} - \omega_y \sin\beta \right) \sin\alpha + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{a_y}{V} + \omega_x \sin\beta \right) \cos\alpha \right]; \\ \frac{d\beta}{dt} &= \frac{a_z}{V} \cos\beta - \left(\frac{a_x}{V} \sin\beta - \omega_y \right) \cos\alpha + \\ &\quad + \left(\frac{a_y}{V} \sin\beta + \omega_x \right) \sin\alpha; \\ \frac{dV}{dt} &= a_x \cos\alpha \cos\beta - a_y \sin\alpha \cos\beta + a_z \sin\beta; \\ \frac{d\vartheta}{dt} &= \omega_y \sin\gamma + \omega_z \cos\gamma; \\ \frac{dy}{dt} &= \omega_x - \operatorname{tg}\vartheta (\omega_y \cos\gamma - \omega_z \sin\gamma), \end{aligned} \quad (4)$$

где обозначения соответствуют описанию модели (1), а ускорения вдоль связанных осей a_x , a_y , a_z выражаются через перегрузки и углы ориентации по формулам (2).

Примем в качестве наблюдений выходные сигналы $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $V(t)$, $\vartheta(t)$, $y(t)$, а в вектор входных сигналов включим измеряемые в полете значения угловых скоростей ω_x , ω_y , ω_z и перегрузок n_x , n_y , n_z . Начальные условия системы (4) задаются по результатам измерений параметров $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $V(t)$, $\vartheta(t)$, $y(t)$ в момент начала участка обработки.

Непосредственное численное интегрирование системы дифференциальных уравнений (4) с учетом (2) в общем случае создает на выходе интегралов погрешности типа линейного тренда. Поэтому введем вектор неизвестных параметров a , состоящий из постоянных составляющих погрешностей измерений сигналов ω_x , ω_y , ω_z и n_x , n_y , n_z :

$$a^T = [C_{\omega_x} \ C_{\omega_y} \ C_{\omega_z} \ C_{n_x} \ C_{n_y} \ C_{n_z}]. \quad (5)$$

Полученную задачу параметрической идентификации можно решить, например, методом максимума правдоподобия [3, 9, 10, 26, 27].

Для повышения точности целесообразно в модели учитывать вынос датчиков перегрузок и датчиков углов атаки и скольжения относительно

центра масс. Поправки к измерениям перегрузок вычисляются по следующим формулам [28]:

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= \frac{1}{g} \left((\omega_y^2 + \omega_z^2) x_0 - \right. \\ &\quad \left. - \omega_x \omega_y y_0 - \omega_z \omega_x z_0 + \frac{d\omega_z}{dt} y_0 - \frac{d\omega_y}{dt} z_0 \right); \\ \Delta n_y &= \frac{1}{g} \left((\omega_z^2 + \omega_x^2) y_0 - \right. \\ &\quad \left. - \omega_y \omega_z z_0 - \omega_x \omega_y x_0 - \frac{d\omega_z}{dt} x_0 + \frac{d\omega_x}{dt} z_0 \right); \\ \Delta n_z &= \frac{1}{g} \left((\omega_x^2 + \omega_y^2) z_0 - \right. \\ &\quad \left. - \omega_z \omega_x x_0 - \omega_y \omega_z y_0 + \frac{d\omega_y}{dt} x_0 - \frac{d\omega_x}{dt} y_0 \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где x_0 , y_0 , z_0 — координаты датчиков в связанный системе с началом координат в центре масс самолета.

В уравнениях (6) оценки производных находим по формулам численного дифференцирования [28].

Поправки к измеренным значениям истинных углов атаки и скольжения, обусловленные выносом датчиков относительно центра масс, вычисляются по формулам [28]:

$$\Delta \alpha_{\text{ист}} = \frac{\omega_z}{V} x_\alpha - \frac{\omega_x}{V} z_\alpha; \quad (7)$$

$$\Delta \beta_{\text{ист}} = \frac{\omega_y}{V} x_\beta - \frac{\omega_x}{V} y_\beta, \quad (8)$$

где x_α , x_β , z_α , y_β — координаты датчиков в связанный системе с началом координат в центре масс самолета, м; V — скорость полета, м/с.

При вычислении скорректированных значений перегрузок n_x , n_y , n_z поправки (6) прибавляются к измеренным значениям n_x изм, n_y изм, n_z изм:

$$\begin{aligned} n_x &= n_x \text{ изм} + \Delta n_x, \quad n_y = n_y \text{ изм} + \Delta n_y, \\ n_z &= n_z \text{ изм} + \Delta n_z. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично поправки (7), (8) добавляются к измеренным в полете истинным значениям углов атаки и скольжения $\alpha_{\text{ист}} \text{ изм}$ и $\beta_{\text{ист}} \text{ изм}$:

$$\alpha_{\text{ист}} = \alpha_{\text{ист}} \text{ изм} + \Delta \alpha_{\text{ист}}, \quad \beta_{\text{ист}} = \beta_{\text{ист}} \text{ изм} + \Delta \beta_{\text{ист}}. \quad (10)$$

Рассмотренный алгоритм обеспечивает нахождение постоянных погрешностей измерений угловых скоростей и перегрузок, включенных в вектор идентифицируемых параметров (5). Однако его главное достоинство заключается в том, что он позволяет оценивать динамические погрешности различных видов.

Представим пример возникновения импульсной погрешности в канале измерения боковой перегрузки n_z (рис. 1, первый график) при подаче импульсов педалями. Амплитуды импульсов погрешности в несколько раз превосходят полезный сигнал датчика, что особенно заметно в течение первых 50 с (время в секундах отложено по оси

абсцисс). Физической причиной является вынос датчиков перегрузки относительно центра масс. Погрешность пропорциональна производной угловой скорости ω_y и хорошо описывается моделью (6). Значения угловой скорости ω_y также даны на рис. 1 (второй график).

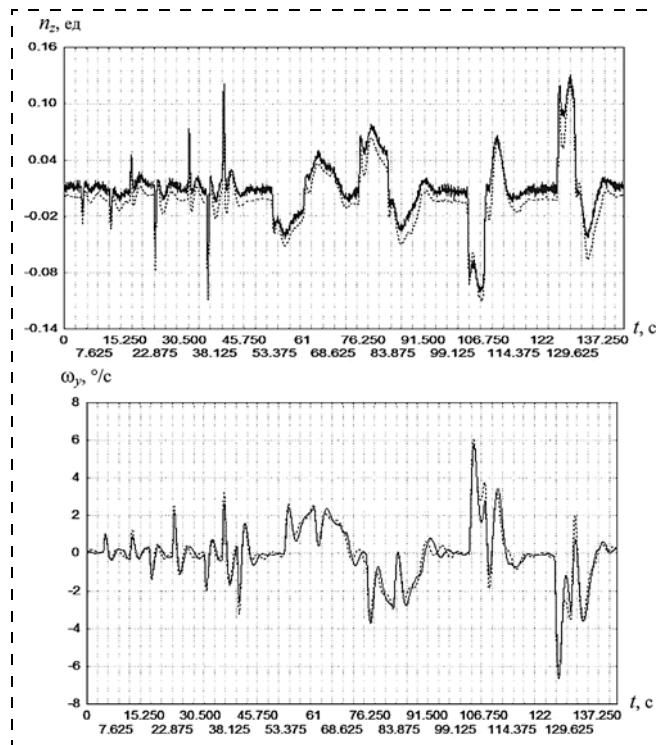


Рис. 1. Импульсные погрешности в канале измерения боковой перегрузки, пропорциональные производной угловой скорости ω_y и обусловленные выносом датчика перегрузки относительно центра масс

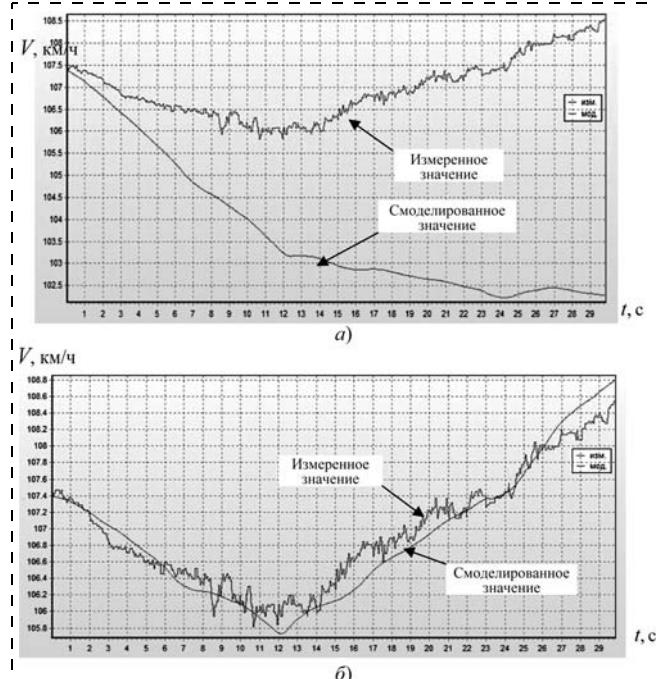


Рис. 2. Сравнение измеренной в полете и вычисленной в модели скорости до (а) и после (б) компенсации постоянных погрешностей датчиков угловых скоростей и перегрузок

На рис. 2 и рис. 3 (см. третью сторону обложки) показан эффект тренда, возникающий при интегрировании системы (4) в каналах скорости и угла крена соответственно. На графиках рис. 2, а и рис. 3, а (см. третью сторону обложки) показаны измеренные и вычисленные в модели значения сигнала при интегрировании уравнений (4), в которые просто подставлялись измеренные в полете входные сигналы — угловые скорости и перегрузки. На графиках рис. 2, б и рис. 3, б (см. третью сторону обложки) показаны вычисленные в модели значения, полученные после идентификации постоянных погрешностей (5) измерения входных сигналов. На рис. 2, а хорошо видно, что нескомпенсированные постоянные погрешности приводят к существенному расхождению измеренных в полете и смоделированных значений скорости, что затрудняет их сравнение. После компенсации расхождения (рис. 2, б) составляют 0,1...0,3 м/с, что подтверждает правильность измерений по этому каналу.

В канале крена (рис. 3, см. третью сторону обложки) уход мал, достигает 2° только в конце участка длительностью 30 с и не препятствует сравнению. На обоих графиках рис. 3 хорошо виден сдвиг по времени $\Delta t \approx 0,2$ с, обусловленный погрешностями синхронизации бортовой системы регистрации, т. е. предлагаемый метод позволяет обнаружить и такой тип погрешности.

На рис. 4 (см. третью сторону обложки) представлено сравнение угла скольжения и воздушной скорости в режиме подачи педалями после компенсации постоянных погрешностей. На этом рисунке левая ось ординат соответствует углу скольжения (в градусах), правая ось ординат — скорости (в м/с), а время в секундах отложено по оси абсцисс. Хорошая сходимость подтверждает правильность работы системы измерений, за исключением положительных углов скольжения свыше $2,5^\circ$ ($t \approx 105$ с и $t \approx 134$ с), когда возникают значительные погрешности измерения скорости (до 5 м/с), вызванные влиянием местного обтекания в точке установки датчика динамического давления.

Идентификация аэродинамических характеристик

Идентификацию аэродинамических характеристик целесообразно проводить раздельно для продольного и бокового каналов. Соответствующие модели легко получить из общей модели (1) с учетом формул (2) и (3) аналогично тому, как выше была получена модель (4) для проверки полетных данных. Для идентификации коэффициентов подъемной силы и момента тангажа достаточно в качестве модели объекта взять уравнения для угла атаки и угловой скорости тангажа, а в модели наблюдений использовать угол атаки, угловую скорость и нормальную перегрузку. Для идентификации коэффициентов бокового движения в модель объекта включаются уравнения для угла скольжения и угловых скоростей крена и рыскания. Вектор

наблюдений содержит измеренные значения этих же сигналов, т. е. полнокомпонентные [29] наблюдения, а также боковую перегрузку. При идентификации продольного канала значения переменных бокового движения заменяются соответствующими измерениями, и наоборот.

Аэродинамические характеристики в общем случае нелинейны. Общепринятый подход заключается в сортировке данных, например, по углу атаки [1, 4, 5, 10, 27]: $\alpha \in [\alpha_k, \alpha_{k+1}], k = 1, 2, \dots, N_k - 1$, где $[\alpha_k, \alpha_{k+1}]$ — участок значений угла атаки шириной $2\dots4^\circ$; N_k — число участков разбиения полного диапазона изменения угла атаки. Предполагается, что на таком участке объект является линейным. Тогда, например, в продольном канале получаем [1, 17]

$$c_{ye} = c_{y0} + c_y^\alpha \alpha + c_y^{\delta_B} \delta_B, \\ m_z = m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\delta_B} \delta_B + m_z^{\bar{\omega}_z} \frac{b_A}{V} \omega_z + m_z^{\bar{a}} \frac{b_A}{V} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (11)$$

Однако допущение о линейности выполняется не всегда. Поэтому для аппроксимации нелинейных зависимостей используются полиномы или сплайны [30], коэффициенты которых включаются в вектор идентифицируемых параметров. Порядки полиномов или сплайнов при этом обычно выбираются не выше третьего. Например, для оценивания зависимости коэффициента момента тангажа от угла атаки $m_z(\alpha)$ используются следующие аппроксимации:

- полиномы второго или третьего порядка

$$m_z(\alpha) = m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\alpha^2} \alpha^2; \\ m_z(\alpha) = m_{z0} + m_z^\alpha \alpha + m_z^{\alpha^2} \alpha^2 + m_z^{\alpha^3} \alpha^3; \quad (12)$$

- сплайны порядка 1 [30]

$$m_z(\alpha) = m_z(\alpha_k)(1 - t) + m_z(\alpha_{k+1})t, \quad (13)$$

где $\alpha \in [\alpha_k, \alpha_{k+1}], k = 1, 2, \dots, N_k - 1$, $t = \frac{\alpha - \alpha_k}{h_k}$, $h_k = \alpha_{k+1} - \alpha_k$;

- эрмитовы сплайны третьего порядка [30], отличающиеся от классических кубических сплайнов тем, что не требуют решения уравнений для узловых точек

$$m_z(\alpha) = \varphi_1(t)m_z(\alpha_k) + \varphi_2(t)m_z(\alpha_{k+1}) + \\ + \varphi_3(t)h_k \frac{dm_z(\alpha_k)}{d\alpha_k}(\alpha_k) + \varphi_4(t)h_k \frac{dm_z(\alpha_{k+1})}{d\alpha_{k+1}}(\alpha_k), \quad (14)$$

где

$$\varphi_1(t) = (1 - t)^2(1 + 2t), \varphi_2(t) = t^2(3 - 2t), \\ \varphi_3(t) = t(1 - t)^2, \varphi_4(t) = -t^2(t - 1),$$

а переменные t, h_k определены выше.

Коэффициенты полиномов или сплайнов включаются в вектор оцениваемых параметров. Для идентификации вектора неизвестных параметров, как и в предыдущей задаче, применяется метод максимума правдоподобия [3, 9, 10, 26, 27]. Результативность такого подхода сильно зависит от того, насколько порядок полинома или расположение узлов сплайна соответствует неизвестной нелинейности.

Графическое представление нелинейностей

Идентификация выполняется в диалоговом режиме, поэтому очень важен учет особенностей восприятия информации человеком-оператором [15]. Для повышения наглядности результатов предлагается воспользоваться уравнениями (1)–(3), из которых следует, что оценки коэффициента подъемной силы в полусвязанной системе координат [31] и коэффициента момента тангажа для дискретных моментов времени $t_i, i = \overline{1, N}$, можно вычислить следующим образом:

$$c_{ye}(t_i) = \\ = \frac{(n_y(t_i)\cos\alpha(t_i) + n_x(t_i)\sin\alpha(t_i))mg - P\sin(\alpha(t_i) + \varphi_{\text{дв}})}{qS}; \quad (15) \\ m_z(t_i) = \left(\frac{J_z}{qSb_A} \right) \left(\frac{d\omega_z(t_i)}{dt} - \frac{J_x - J_y}{J_z} \omega_x(t_i)\omega_y(t_i) + \right. \\ \left. + \frac{(k_{\text{дв}}\omega_y(t_i) + P\omega_{\text{дв}})}{J_z} \right),$$

где $\varphi_{\text{дв}}$ — угол установки двигателей (рад), а остальные обозначения раскрыты при описании модели (1)–(3) и соответствуют работе [31]. При расчете производную $d\omega_z(t_i)/dt$ находим численно [10, 11, 28], тягу $P = P_{\text{пр}} + P_{\text{лев}}$ задаем по высотно-скоростным характеристикам двигателя.

Рассмотрим широко распространенный частный случай, когда нелинейные модели коэффициентов продольного движения имеют следующий вид:

$$c_{ye} = c_{ye}(\alpha) + c_{ye}^{\delta_B} \delta_B, \\ m_z = m_z(\alpha) + m_z^{\delta_B} \delta_B + m_z^{\bar{\omega}_z} \frac{b_A}{V} \omega_z + m_z^{\bar{a}} \frac{b_A}{V} \frac{d\alpha}{dt}. \quad (16)$$

Выражение для коэффициента момента запишем в виде [1, 17]

$$m_z = m_z(\alpha) + m_z^{\delta_B} \delta_B + (m_z^{\bar{\omega}_z} + m_z^{\bar{a}}) \frac{b_A}{V} \omega_z, \quad (17)$$

где комплекс вращательных производных $m_z^{\bar{\omega}_z} + m_z^{\bar{a}}$ представляется как один коэффициент [17], поскольку при маневрировании в продольном канале соотношение $\omega_z \approx d\alpha/dt$ выполняется с высокой точностью.

Теперь для нелинейностей $c_{ye}(\alpha), m_z(\alpha)$ в соотношениях (16)–(17) зададим какую-либо аппроксима-

цию вида (12)–(14). Структура такой аппроксимации может и не соответствовать истинной нелинейной зависимости, которая на данном этапе неизвестна. Выполним параметрическую идентификацию. Опыт показывает [4, 5, 10], что точность оценок линейных коэффициентов $\tilde{c}_{ye}^{\delta_B}$, $\tilde{m}_z^{\delta_B}$, $(\tilde{m}_z^{\bar{\omega}_z} + \tilde{m}_z^{\bar{\alpha}})$ является высокой даже при неточной аппроксимации нелинейностей. Тогда, используя полученные оценки коэффициентов и расчеты по формулам (15), можно представить оценки нелинейных зависимостей в явном виде в функции времени t_i , $i = \overline{1, N}$:

$$c_{ye}(\alpha(t_i)) = c_{ye}(t_i) - \tilde{c}_{ye}^{\delta_B} \delta_B(t_i); \quad (18)$$

$$m_z(\alpha(t_i)) = m_z(t_i) - \tilde{m}_z^{\delta_B} \delta_B(t_i) - (\tilde{m}_z^{\bar{\omega}_z} + \tilde{m}_z^{\bar{\alpha}}) \frac{b_A}{V} \omega_z(t_i). \quad (19)$$

Далее строятся графики этих оценок в функции угла атаки $\alpha(t_i)$, наглядно отображающие нелинейность. Это позволяет определить структуру нелинейности, т. е. порядок полинома или расположение узлов сплайна.

Примеры идентификации нелинейных зависимостей по данным летных испытаний

Результаты применения изложенного выше подхода в ходе летных испытаний представлены на рис. 5 (см. третью сторону обложки). Эксплуатационный диапазон углов атаки был разделен на участки, на которых выполнялись симметричные отклонения ручки управления самолетом "на себя" и "от себя" так, чтобы приращения угла атаки составляли $\pm(2\dots3)^\circ$. На рис. 5 в виде точек показаны вычисленные по формуле (19) оценки $m_z(\alpha(t_i))$, $i = \overline{1, N}$, которые сливаются в "облака" в силу большого числа N измерений. Каждое "облако" соответствует одному участку полета с определенным диапазоном изменения угла атаки. Хорошо видно, что на углах атаки выше 11° даже на отдельных участках имеет место нелинейный характер зависимости $m_z(\alpha)$. Маневры на всех пяти участках выполнялись с перекрытием, что позволяет подтвердить согласованность результатов.

На рис. 6 (см. третью сторону обложки) для другой конфигурации показаны оценки идентификации зависимости $m_z(\alpha)$ на пяти участках в сравнении с банком характеристик, полученных в аэродинамической трубе (показаны крупными точками).

В целом степень соответствия высокая, несмотря на некоторые отличия при углах атаки выше 14° .

На рис. 7 (см. третью сторону обложки) оценки идентификации коэффициента подъемной силы на семи участках весьма точно совпадают с данными трубного эксперимента. На рис. 6, 7 вычисленные оценки также показаны в виде точек, сливающихся в "облака" в силу большого числа измерений.

Рассмотрим пример, характеризующий значение формы представления данных при практичес-

ком выполнении идентификации аэродинамических характеристик. На рис. 8 для шести участков полета показаны оценки коэффициента подъемной силы методом максимума правдоподобия, в котором для описания нелинейности использовались полиномы второго порядка. Здесь же показана зависимость $c_{ye}(\alpha)$, взятая из банка аэродинамических характеристик.

Первоначально при анализе результатов идентификации по шести участкам сравнивались оценки коэффициентов полиномов, которые оказались существенно различными. Тогда было принято решение отобразить полиномы на одном графике так, чтобы оценки идентификации отображались только для тех значений угла атаки, которые имели место на данном участке полета. Из рис. 8 видно, что такой методический прием позволяет сделать вывод о высокой степени соответствия оценок по различным участкам и, следовательно, о несоответствии банка оценкам идентификации, полученным в летном эксперименте. Действительно, графики полиномиальных оценок имеют разные наклоны и смещения (т. е. разные коэффициенты полиномов), но в целом проходят близко друг от друга.

В ряде случаев целесообразно сопоставлять оценки различных методов идентификации.

Обратимся еще раз к рис. 8. Взятая из банка зависимость $c_{ye}(\alpha)$ имеет на углах атаки выше $14,5^\circ$ характерный изгиб, указывающий на близость к критическому углу атаки [17], тогда как полиномиальная оценка сохраняет постоянный наклон. Однако выше мы убедились, что наклоны полиномиальных оценок имеют значительный разброс.

На рис. 9 для одного из участков построены вычисленные по формуле (18) точечные оценки $c_{ye}(\alpha(t_i))$, $i = \overline{1, N}$, где N – число измерений на участке. Такие оценки очень чувствительны к локальным изменениям в отличие от полиномов, описывающих весь участок.

Действительно, график на рис. 9 воспроизводит изгиб на угле атаки $14,3^\circ$, что совпадает с банком.

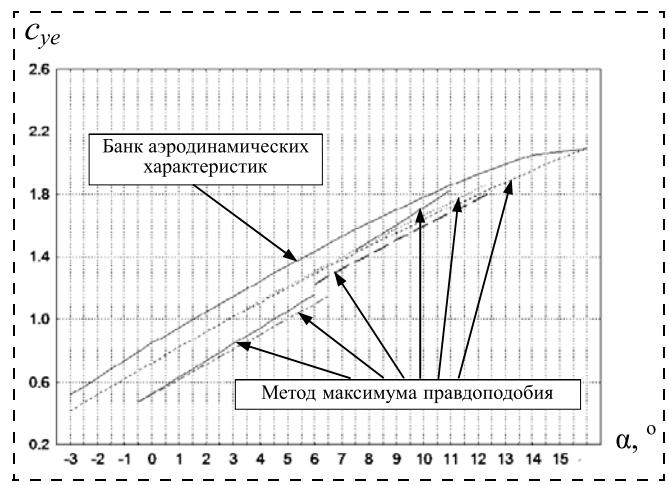


Рис. 8. Сравнение полиномиальных оценок коэффициента подъемной силы с банком аэродинамических характеристик

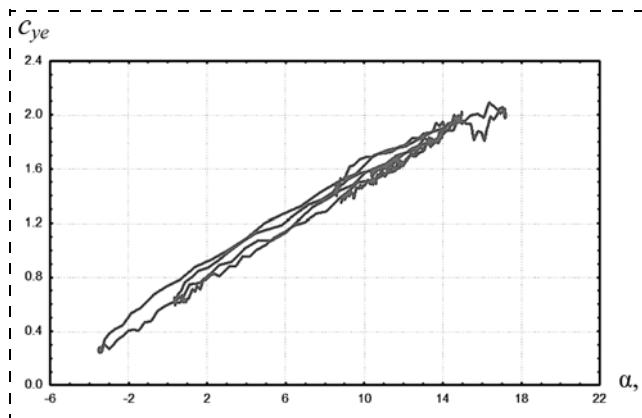


Рис. 9. Точечные оценки коэффициента подъемной силы $c_{ye}(\alpha)$, вычисленные по формуле (18)

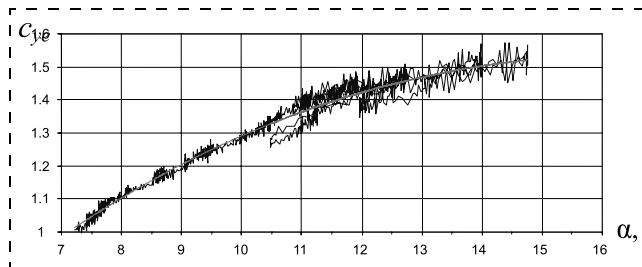


Рис. 10. Точечные оценки коэффициента подъемной силы и их аппроксимация эрмитовым сплайном 3-го порядка с тремя узлами

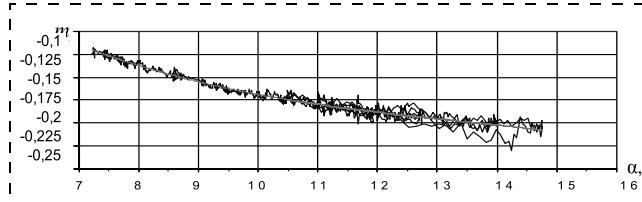


Рис. 11. Точечные оценки коэффициента момента тангажа и их аппроксимация эрмитовым сплайном 3-го порядка с двумя узлами

Таким образом, следует сделать окончательный вывод, что коэффициент подъемной силы в банке во всем диапазоне завышен на 0,1...0,15, однако характер нелинейности для углов атаки выше 14° представлен в банке правильно.

К полученным по формулам (18)–(19) точечным оценкам целесообразно применить рассмотренные выше варианты аппроксимации. При этом коэффициенты полиномов или сплайнов определяются методом множественной регрессии [1, 3, 9]. На рис. 10, 11 показаны точечные оценки коэффициентов подъемной силы и момента тангажа и их аппроксимация эрмитовыми сплайнами третьего порядка с малым числом узлов (обычно 2 или 3). Такие аппроксимации удобно сравнивать с банком и использовать для коррекции банка аэродинамических характеристик.

Заключение

В статье изложены алгоритмические и методические подходы к обработке полетных данных при

идентификации нелинейных аэродинамических коэффициентов самолетов по данным летных испытаний в эксплуатационном диапазоне углов атаки. Представлены примеры практического применения рассмотренных методов и алгоритмов для идентификации аэродинамических коэффициентов современных самолетов.

Показано значение формы представления результатов идентификации для их правильной интерпретации. Представленные алгоритмические и методические результаты позволяют уточнять математические модели самолетов по данным летных испытаний.

Список литературы

- Белоцерковский С. М., Качанов Б. О., Кулифеев Ю. Б., Морозов В. И. Создание и применение математических моделей самолетов. М.: Наука, 1984. 143 с.
- Васильченко К. К., Кочетков Ю. А., Леонов В. А., Поплавский Б. К. Структурная идентификация математической модели движения самолета. М.: Машиностроение. 1993. 352 с.
- Klein V., Morelli E. A. Aircraft System Identification: Theory and Practice. — USA, Reston: AIAA. 2006. 499 p.
- Корсун О. Н., Поплавский Б. К. Технология идентификации аэродинамических коэффициентов летательных аппаратов по данным летных испытаний // В сб.: Моделирование авиационных систем. М.: ГосНИИАС, 2011. С. 444–451.
- Корсун О. Н., Поплавский Б. К. Структура методологии идентификации математических моделей самолетов по результатам летных испытаний // В сб.: Авиационные технологии XXI века // IX междунар. научно-техн. симпозиум ASTEC'07. 2007.
- Кулифеев Ю. Б. Дискретно-непрерывный метод идентификации непрерывных систем // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1981. № 5. С. 47–55.
- Корсун О. Н. Алгоритм идентификации динамических систем с функционалом в частотной области // Автоматика и телемеханика. 2003. № 5. С. 111–121.
- Овчаренко В. Н. Адаптивная идентификация параметров в динамических и статических системах // Автоматика и телемеханика. 2011. № 3. С. 113–123.
- Корсун О. Н. Методы параметрической идентификации технических систем. Электронное учебное пособие. № госрегистрации: 0321100941. <http://catalog.inforeg.ru/Inet/GetEzineByID/286062> / М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
- Корсун О. Н., Николаев С. В. Методика идентификации аэродинамических коэффициентов продольного движения самолета в эксплуатационном диапазоне углов атаки // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 4. С. 269–276.
- Николаев С. В. Оценивание устойчивости и управляемости авиационных комплексов с применением моделирования и идентификации // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 10. С. 71–84.
- Корсун О. Н., Семенов А. В. Оценка пилотажных характеристик самолетов по результатам летного эксперимента, идентификации и моделирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. № 7. С. 2–7.
- Корсун О. Н. Принципы параметрической идентификации математических моделей самолетов по данным летных испытаний // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 6. С. 2–7.
- Гребнев О. Н., Корсун О. Н. Минимизация погрешности идентификации, обусловленных неточной информацией о структуре математической модели летательного аппарата и системы измерений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 59–64.
- Себряков Г. Г., Татарников И. Б., Тюфлин Ю. С. и др. Принципы создания универсальных систем визуализации комплексов моделирования для задач обучения, ситуационного анализа и тренажера // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2006. № 3. С. 48–50.

16. Себряков Г. Г. Проблемы проектирования полуавтоматических систем наведения летательных аппаратов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2007. № 10. С. 2–7.

17. Аэродинамика, устойчивость и управляемость сверхзвуковых самолетов / Под ред. Г. С. Бюшгена. М.: Наука, 1998. 816 с.

18. Зиновьев А. В., Барков Б. В., Чуйко А. А. и др. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: Изд. дом "Академия Жуковского", 2013. 235 с.

19. Пушкин С. Г., Горшкова О. Ю., Корсун О. Н. Математические модели погрешностей бортовых измерений скорости и угла атаки на режимах посадки самолета // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 8. С. 66–70.

20. Пушкин С. Г., Корсун О. Н., Яцко А. А. Оценивание погрешностей определения индикаторной земной скорости в летных испытаниях авиационной техники с применением спутниковых навигационных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 11. С. 771–776.

21. Пушкин С. Г., Ловицкий Л. Л., Корсун О. Н. Методы определения скорости ветра при проведении летных испытаний авиационной техники с применением спутниковых навигационных систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 9. С. 65–70.

22. Корсун О. Н., Зиновьев А. В., Лысюк О. П. и др. Алгоритм оценивания постоянной составляющей погрешности измерения воздушной скорости при учете скорости ветра // Вестник компьютерных и информационных технологий". 2008. № 9. С. 2–6.

23. Корсун О. Н., Лысюк О. П., Зиновьев А. В. Оценивание погрешностей измерения скорости спутниковой навигационной системы движения летательных аппаратов с использованием информационной избыточности // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6. № 11. С. 77–82.

24. Корсун О. Н., Лысюк О. П. Комплексная оценка погрешностей бортовых измерений и регистрации в целях обеспечения задач безопасности полетов // Проблемы безопасности полетов. 2007. № 2. С. 31–41.

25. Корсун О. Н., Мотлич П. А. Комплексный контроль бортовых измерений основных параметров полета летательного аппарата // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013. № 1. С. 135–148.

26. Булгаков В. В., Кулабухов В. С., Стуловский А. В. и др. Алгоритмы повышения точности расчета углов ориентации летательного аппарата // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2016. № 1. С. 159–170.

27. Jategaonkar R. V. Flight Vehicle System Identification: A Time Domain Methodology. — USA, Reston: AIAA. 2006. — 410 р.

28. Васильченко К. К., Леонов В. А., Пашковский И. М. и др. Летные испытания самолетов. М.: Машиностроение, 1996. 745 с.

29. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. Красовского А. А. М.: Наука, 1987. 711 с.

30. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука. 1980. 355 с.

31. ГОСТ 20058–80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. М.: Изд-во стандартов, 1981. 54 с.

Algorithms for Validation of the Flight Data and Evaluation of the Nonlinearities of the Aerodynamic Coefficients of the Aircraft

O. N. Korsun, marmotto@rambler.ru✉,

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

S. V. Nikolayev, nikozavr@mail.ru,

State Flight Test Center named after V. P. Chkalov, 416510, Akhtubinsk,

B. K. Poplavsky, boris.poplavsky2001@yandex.ru,

Flight Research Institute named after M. M. Gromov, 140180, Zhukovsky, Russian Federation

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

Received on September, 15, 2016

Accepted on November, 20, 2016

The system identification methods make an important part of the flight test data analysis. Due to these methods accurate aircraft parameter estimations can be obtained, which meet the requirements of numerous applications, such as simulators and flight control systems design, aircraft modernization, etc. The aircraft parameter identification, when applied to the processing of the actual flight test data, faces the following principal problems: inevitable differences between a physical object and the adopted mathematical models; an essential incorrectness of the identification problem, since it belongs to the class of the inverted problems of dynamics. The presented techniques are intended to overcome those difficulties, using a system approach. That means that the identification problem is treated as an integral multistage system, designed on certain basic principles. These principles are the following: every stage includes a verification procedure; a decomposition of the general problem into minor subproblems; a systematic search for all the useful information in the relevant disciplines; an important role of a human operator. The article presents an algorithmic and methodological support for monitoring of the correctness of the airborne measurements and estimation of the aerodynamic nonlinearities for identification of the aerodynamic coefficients of the aircraft according to flights test. The paper also presents numerous examples of the practical applications of the considered methods and algorithms in the process of the parameters identification of the mathematical models of certain modern aircraft, using the flight test data. The authors believe that the choice of those examples would be helpful for understanding of the typical problems of the aircraft parameter identification.

Keywords: identification of the parameters of the mathematical models of the aircraft, flight tests, identification of the aerodynamic coefficients, compatibility check of the onboard measurements

For citation: Korsun O. N., Nikolayev S. V., Poplavsky B. K. Algorithms for Validation of the Flight Data and Evaluation of the Nonlinearities of the Aerodynamic Coefficients of the Aircraft, Me-

хатроника, Автоматизация, Управление, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 270–278.

DOI: 10.17587/mau.18.270-278

References

1. **Belocerkovskij S. M., Kachanov B. O., Kulifeev Ju. B., Morozov V. I.** *Sozdanie i primenie matematicheskikh modelej samoletov* (The Creation and use of mathematical models of the aircraft), Moscow, Nauka, 1984. 143 p. (in Russian).
2. **Vasil'chenko K. K., Kochetkov Ju. A., Leonov V. A., Poplavskij B. K.** *Strukturnaja identifikacija matematicheskoy modeli dvizhenija samoleta* (Structural identification of mathematical model of the motion of the aircraft), Moscow, Mashinostroenie. 1993. 352 p. (in Russian).
3. **KleinV., Morelli E. A.** *Aircraft System Identification: Theory And Practice*. USA, Reston: AIAA, 2006. 499 p.
4. **Korsun O. N., Poplavskij B. K.** *Tehnologija identifikacii ajerodinamicheskikh koeficientov letatel'nyh apparatov po dannym letnyh ispytanij* (Technology for identification of aerodynamic coefficients of the aircraft according to flight test), *Modelirovanie Aviacionnyh Sistem*, GosNIAS, 2011, pp. 444–451 (in Russian).
5. **Korsun O. N., Poplavskij B. K.** *Strukturna metodologija identifikacii matematicheskikh modelej samoletov po rezul'tatam letnyh ispytanij* (Structure of methodology for certification mathematical models of aircraft flight test results), *Aviacionnye tehnologii XXI veka. IX mezhdunarodnyj nauchno-tehnicheskij simpozium ASTEC'07*, 2007 (in Russian).
6. **Kulifeev Ju. B.** *Diskretno-nepryevnyj metod identifikacii nepryevnyh system* (Discrete-continuous method of identification of continuous systems), *Izv. AN SSSR. Mehanika Tverdogo Tela*, 1981, no. 5, pp. 47–55 (in Russian).
7. **Korsun O. N.** *Algoritm identifikacii dinamicheskikh sistem s funkcionalom v chastotnoj oblasti* (The algorithm of identification of dynamic systems with functions in the frequency domain), *Avtomatika i Telemehanika*, 2003, no. 5, pp. 111–121 (in Russian).
8. **Ovcharenko V. N.** *Adaptivnaja identifikacija parametrov v dinamicheskikh i staticheskikh sistemah* (Adaptive identification of parameters in dynamic and static systems), *Avtomatika i Telemehanika*, 2011, no. 3, pp. 113–123 (in Russian).
9. **Korsun O. N.** *Metody parametricheskoy identifikacii tehnicheskikh system* (Methods for parametric identification of technical systems), *Elektronnoe uchebnoe izdanie, uchebnoe posobie po discipline "Identifikacija ispytatel'nyh i izmeritel'nyh processov"*. № gosregistracii: 0321100941. <http://catalog.infoeg.ru/Inet/GetEzineByID/286062> / Moskva, MGTU im. N. Je. Baumana, 2011 (in Russian).
10. **Korsun O. N., Nikolaev S. V.** *Metodika identifikacii ajerodinamicheskikh koeficientov prodol'nogo dvizhenija samoleta v jekspluatacionnom diapazone uglov ataki* (a Method of identification of aerodynamic coefficients of longitudinal motion of the aircraft in the operational range of angles of attack), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 4, pp. 269–276 (in Russian).
11. **Nikolaev S. V.** *Ocenivanie ustojchivosti i upravljаемosti aviacionnyh kompleksov s primeneniem modelirovaniya i identifikacii* (Estimation of stability and control of aircraft systems with the use of modelling and identification), *Aviakosmicheskoe Priborostroenie*, 2015, no. 10, pp. 71–84 (in Russian).
12. **Korsun O. N., Semenov A. V.** *Ocenka pilotazhnyh harakteristik samoletov po rezul'tatam letnogo jeksperta, identifikacii i modelirovaniya* (the Evaluation of flight characteristics of the aircraft according to the results of the flight test identification and simulation), *Vestnik Komp'juternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2007, no. 7, pp. 2–7 (in Russian).
13. **Korsun O. N.** *Principy parametricheskoy identifikacii matematicheskikh modelej samoletov po dannym letnyh ispytanij* (Principles of parametric identification of mathematical models of aircraft according to flight test), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2008, no. 6, pp. 2–7 (in Russian).
14. **Grebnev O. N., Korsun O. N.** *Minimizacija pogreshnostej identifikacii, obuslovlennyh netochnoj informacij o strukture matematicheskoy modeli letatel'nogo apparata i sistemy izmerenij* (Minimization of the identification errors due to inaccurate information on the structure of the mathematical model of the aircraft and measurement systems), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2009, no. 9, pp. 59–64 (in Russian).
15. **Sebrjakov G. G., Tatarnikov I. B., Tjuflin Ju. S.** i dr. *Principy sozdanija universal'nyh sistem vizualizacii kompleksov modelirovaniya dlja zadach obuchenija, situacionnogo analiza i trenazha* (the Principles of creating a universal system of visualization of complex simulation for training, situational analysis and training), *Vestnik Komp'juternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2006, no. 3, pp. 48–50 (in Russian).
16. **Sebrjakov G. G.** *Problemy proektirovaniya poluavtomaticheskikh sistem navedenija letatel'nyh apparatov* (Problems of design of semi-automatic guidance system of aircraft), *Vestnik Komp'juternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2007, no. 10, pp. 2–7 (in Russian).
17. **Bjushgensa G. S.** ed. *Ajerodinamika, ustojchivost' i upravljаемost' sverhzvukovyh samoletov* (Aerodynamics, stability and controllability of supersonic aircraft), Moscow, Nauka, Fizmalit, 1998, 816 p. (in Russian).
18. **Zinov'ev A. V., Barkov B. V., Chujko A. A.** i dr. *Metrologija, standartizacija i sertifikacija* (Metrology, standardization and certification), Moscow, Izdatel'skij dom "Akademija Zhukovskogo", 2013, 235 p. (in Russian).
19. **Pushkov S. G., Gorshkova O. Ju., Korsun O. N.** *Matematicheskie modeli pogreshnostej bortovyh izmerenij skorosti i ugla ataki na rezhimah posadki samoleta* (A mathematical model of errors of on-board measurements of speed and angle of attack for landing), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 8, pp. 66–70 (in Russian).
20. **Pushkov S. G., Korsun O. N., Jacko A. A.** *Ocenivanie pogreshnostej opredelenija indikatornoj zemnoj skorosti v letnyh ispytanijah aviacionnoj tehniki s primeneniem sputnikovyh navigacionnyh system* (Estimation of measurement errors of the indicator of the earth's speed in flight tests of aviation technics with use of satellite navigation systems), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 11, pp. 771–776 (in Russian).
21. **Pushkov S. G., Lovickij L. L., Korsun O. N.** *Metody opredelenija skorosti vetra pri provedenii l'jotnyh ispytanij aviacionnoj tehniki s primeneniem sputnikovyh navigacionnyh system* (Methods of determining the speed of the wind when conducting flight tests of aviation technology with the use of satellite navigation systems), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2013, no. 9, pp. 65–70 (in Russian).
22. **Korsun O. N., Zinov'ev A. V., Lysjuk O. P.** i dr. *Algoritmov ocenivaniya postojannoj sostavljushhej pogreshnosti izmerenija vozdušnoj skorosti pri uchete skorosti vetra* (Algorithm for estimating the permanent component of the error of measuring the air speed at the given wind speed), *Vestnik Komp'juternyh i Informacionnyh Tehnologij*, 2008, no. 9, pp. 2–6 (in Russian).
23. **Korsun O. N., Lysjuk O. P., Zinov'ev A. V.** *Ocenivanie pogreshnostej izmerenija skorosti sputnikovoj navigacionnoj sistemy dvizhenija letatel'nyh apparatov s ispol'zovaniem informacionnoj izbytochnosti* (Estimation of errors of measurement of the speed of the satellite navigation system of the aircraft movement with the use of information redundancy), *Informacionno-Izmeritel'nye i Upravljajushchie Sistemy*, 2008, vol. 6, no. 11, pp. 77–82 (in Russian).
24. **Korsun O. N., Lysjuk O. P.** *Kompleksnaja ocenka pogreshnostej bortovyh izmerenij i registracii v celjah obespechenija zadach bezopasnosti poletov* (Comprehensive assessment of errors on board measurements and registration to ensure task safety), *Problemy Bezopasnosti Poletov*, 2007, no. 2, pp. 31–41 (in Russian).
25. **Korsun O. N., Motlich P. A.** *Kompleksnyj kontrol' bortovyh izmerenij osnovnyh parametrov poleta letatel'nogo apparata* (Integrated control Board measurements of the main parameters of flight of the aircraft), *Nauka i Obrazovanie*, 2013, no. 1, pp. 135–148 (in Russian).
26. **Bulgakov V. V., Kulabuhov V. S., Stulovskij A. V.** i dr. *Algoritmy povyshenija tochnosti rascheta uglov orientacii letatel'nogo apparata* (algorithms to improve the accuracy of the calculation of the orientation angles of the aircraft). *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, *Izvestija Rossijskoj Akademii Nauk. Teoriya i Sistemy Upravlenija*, 2016, no. 1, pp. 159–170 (in Russian).
27. **Jategaonkar R. V.** Flight Vehicle System Identification: A Time Domain Methodology. USA, Reston, AIAA, 2006, 410 p.
28. **Vasil'chenko K. K., Leonov V. A., Pashkovskij I. M.** i dr. *Letnye ispytanija samoletov* (Flight test aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1996, 745 p. (in Russian).
29. **Krasovskii A. A.** ed. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija* (A Handbook on theory of automatic control), Moscow, Nauka, 1987, 711 p. (in Russian).
30. **Zav'jalov Ju. S., Kvasov B. I., Miroshnichenko V. L.** *Metody splajn-funkcij* (Methods of spline-functions), Moscow, Nauka, 1980, 355 p. (in Russian).
31. **GOST 20058–80. Dinamika letatel'nyh apparatov v atmosfere. Terminy, opredelenija i oboznachenija** (Dynamics of aircraft in the atmosphere. Terms, definitions and symbols), Moscow, Izdatel'stvo standartov, 1981, 54 p. (in Russian).

Е. В. Гошин^{1, 2}, канд. техн. наук, доц., goshine@yandex.ru,

И. Р. Усеинова¹, бакалавр, inessa.useinova@gmail.com,

¹Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(Самарский университет), Самара, Россия,

²Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия

Метод определения внешних параметров камеры по паре изображений с использованием дуальных кватернионов¹

Предлагается метод определения положения и ориентации движущегося аппарата по изображениям с одной фиксированной камеры, основанный на использовании дуальных кватернионов для описания точек трехмерного пространства и параметров координат, а также плоккеровых координат для описания прямых в трехмерном пространстве. Проведен эксперимент по установлению связи ошибок входных данных (координат точек на изображениях) и погрешностей полученных оценок поворота и сдвига.

Ключевые слова: разноракурсная съемка, внешние параметры камеры, кватернионы, плоккеровы координаты

Введение

При решении практических задач, связанных с использованием движущихся аппаратов, возникает задача определения неизвестных параметров движения по данным, полученным с камеры, статично зафиксированной на поверхности этого аппарата. В этих случаях, как правило, считается, что сцена представляет собой неподвижную структуру, при этом на сцене присутствуют объекты различного масштаба. Следует отметить, что область применения таких аппаратов не ограничивается каким-либо одним узким приложением: в зависимости от масштаба съемки исследования ведутся как для получения трехмерных моделей обстановки с использованием смартфонов [1], так и для построения масштабных моделей по изображениям, полученным с беспилотных летательных аппаратов [2], и даже для аэрокосмической съемки [3].

Когда параметры съемки (и, соответственно, положения и ориентации аппарата в пространстве) не известны, возникает задача оценки этих параметров. В качестве исходных данных (при отсутствии информации о перемещении аппарата) выступают изображения, полученные с различных ракурсов. Традиционно задача оценки параметров поворота и сдвига сводится к определению так называемой фундаментальной матрицы и последующему вычислению искомых матриц [4]. Однако использование такого подхода обладает рядом недостатков. В частности, когда большая часть предварительно определенных на изображениях точек расположена на одной плоскости, определение фундаментальной матрицы сопряжено с серьезными погрешностями, что, в свою очередь, ведет к ошибкам в определении параметров съемки.

В отличие от традиционного подхода соответствующие точки в настоящей работе используются не для определения фундаментальной матрицы, а непосредственно для определения (внешних и внутренних) параметров съемки. Кроме того, в дан-

ной работе используется модель формирования разноракурсных изображений, основанная на представлении трехмерных изображений и параметров съемки в виде дуальных кватернионов.

Таким образом, задача состоит в определении параметров сдвига и поворота камеры по заданным координатам N пар соответствующих точек $\mathbf{m} = \mathbf{m}(u, v)$ и $\mathbf{m}' = \mathbf{m}(u', v')$ на двух изображениях.

Традиционный подход

В работе будет использоваться модель камеры-обскуры, задающая связь между точками в трехмерном пространстве и координатами их проекций на изображениях [5, 6] следующим образом:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \text{ где } \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \propto [\mathbf{R}|\mathbf{t}] \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Здесь (X, Y, Z) — координаты точки в трехмерном пространстве; (x, y) — координаты этой точки на плоскости проекции камеры; (u, v) — координаты соответствующего пикселя на изображении, регистрируемом этой камерой; \mathbf{K} — известная матрица внутренних параметров камеры; \mathbf{R} и \mathbf{t} — матрица поворота и вектор сдвига соответственно, а знак " \propto " обозначает отношение пропорциональности, т. е. равенство левой и правой частей с точностью до масштаба.

Традиционный подход к определению положения и ориентации в пространстве включает в себя этап поиска фундаментальной матрицы [7]. Фундаментальная матрица есть матрица, удовлетворяющая следующему требованию:

$$(\mathbf{m}')^T \mathbf{F} \mathbf{m} = (x' \ y' \ 1) \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}$$

и может быть найдена с использованием восьмиточечного алгоритма [8] по набору заранее заданных соответствующих точек. С использованием фундаментальной матрицы при известной матрице

¹ Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00729 а).

внутренних параметров съемки \mathbf{K} может быть найдена так называемая существенная матрица:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{K}^T \mathbf{F} \mathbf{K}.$$

Традиционный подход основан на выполнении сингулярного разложения существенной матрицы, которое дает следующее выражение:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^T,$$

где \mathbf{U} и \mathbf{V} — ортогональные матрицы, а $\boldsymbol{\Sigma}$ — диагональная матрица следующего вида:

$$\boldsymbol{\Sigma} = \begin{pmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Два диагональных значения $\boldsymbol{\Sigma}$ должны быть равны между собой, а третье — равно нулю.

Если определить матрицу \mathbf{W} следующим образом:

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \mathbf{W}^{-1} = \mathbf{W}^T = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

то

$$[\mathbf{t}]_x = \mathbf{V} \mathbf{W} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^T, \mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{V}^T,$$

где

$$[\mathbf{t}]_x = \begin{pmatrix} 0 & t_Z & -t_Y \\ -t_Z & 0 & t_X \\ t_Y & -t_X & 0 \end{pmatrix}, \mathbf{t} = \begin{pmatrix} t_X \\ t_Y \\ t_Z \end{pmatrix}.$$

Поскольку $\boldsymbol{\Sigma}$ может не вполне удовлетворять требованиям равенства диагональных значений, в качестве альтернативы обычно используется следующее выражение:

$$[\mathbf{t}]_x = \mathbf{V} \mathbf{Z} \mathbf{V}^T,$$

$$\text{где } \mathbf{Z} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Ранее автором были предложены метод и алгоритм решения этой задачи без использования промежуточного этапа определения фундаментальной матрицы [9], однако традиционная модель формирования изображения, использованная в работе, обладает рядом недостатков. В частности, задание поворота с использованием матрицы порождает избыточность данных и неоднозначность представления [10]. Наличие данных недостатков порождает сложности в реализации предложенного метода.

В данной работе используется модель преобразования координат разноракурсных изображений, основанная на представлении трехмерных изображений и параметров съемки в виде дуальных кватернионов, и предлагается метод поиска параметров камер, основанный на использовании плюккеровых координат для описания прямых в трехмерном пространстве.

Модель преобразования координат

Кватернионы используются для записи вращения в робототехнике, игровых двигателях, а также при моделировании, где необходимо избегать больших погрешностей с углами Эйлера или матрицами. Использование дуальных кватернионов обладает высокой эффективностью и меньшей погрешностью, чем использование традиционных матричных преобразований. Существует множество способов задания поворота в пространстве, но только кватернионы однозначно описывают вращение в трехмерном пространстве и обладают свойствами как вектора, так и гиперкомплексного числа.

Кватернион q представляет собой упорядоченную четверку вещественных чисел (q_0, q_1, q_2, q_3) и может быть определен как формальная сумма:

$$q = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k, \quad (1)$$

где i, j, k — мнимые единицы со следующим свойством:

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1. \quad (2)$$

Операции над кватернионами определяются как операции над многочленами с учетом свойства (2).

Норма и модуль кватерниона определены следующим образом:

$$\|q\| = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2,$$

$$|q| = \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}.$$

Сопряжение кватерниона q обозначается q^* и определяется как

$$q^* = q_0 - q_1 i - q_2 j - q_3 k, \quad (3)$$

таким образом:

$$qq^* = q^*q = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = \|q\|.$$

Число $Q = p + q\varepsilon$ называется дуальным кватернионом, если p и q — кватернионы [11], а ε — нильпотентный элемент ($\varepsilon \neq 0, \varepsilon^2 = 0$). Дуальный кватернион может быть записан в виде суммы действительной p и дуальной $q\varepsilon$ частей:

$$Q = p_0 + p_1 i + p_2 j + p_3 k + q_0 \varepsilon + q_1 \varepsilon i + q_2 \varepsilon j + q_3 \varepsilon k. \quad (4)$$

Кроме того, для записи дуального кватерниона далее будет использоваться следующее обозначение:

$$Q = ((p_0, p_1, p_2, p_3), (q_0, q_1, q_2, q_3)). \quad (5)$$

Чтобы избежать неоднозначности, связанной с обозначением дуального кватерниона в виде восьмерки чисел (5), скалярное произведение в данной работе будет обозначаться $\langle a, b \rangle$.

Операции, выполнимые с дуальными кватернионами, определяются как обычные операции с кватернионами с учетом $\varepsilon^2 = 0$. Помимо заданного выше сопряжения (3) Q^* для дуальных кватернионов определены еще два сопряжения:

$$Q^\bullet = p - q\varepsilon = p_0 + p_1 i + p_2 j + p_3 k - q_0 \varepsilon - q_1 \varepsilon i - q_2 \varepsilon j - q_3 \varepsilon k; \quad (6)$$

$$Q^\diamond = (Q^*)^\bullet = p_0 - p_1 i - p_2 j - p_3 k - q_0 \varepsilon + q_1 \varepsilon i + q_2 \varepsilon j + q_3 \varepsilon k. \quad (7)$$

Для любой точки пространства вектор, связанный начало координат и эту точку, может быть описан с помощью дуального кватерниона: $v = ((1, 0, 0, 0), (0, X, Y, Z))$.

Тогда, для того чтобы выполнить поворот вектора (X, Y, Z) , описываемого кватернионом v , на угол $\theta \in [0, \pi]$ вокруг оси, направление которой задает единичный вектор $\hat{u} = (u_X, u_Y, u_Z)$, и сдвиг данной точки на вектор (t_X, t_Y, t_Z) , необходимо выполнить следующую операцию:

$$v' = \sigma v \sigma^*, \quad (8)$$

где

$$\sigma = \left(Q_R \frac{1}{2} Q_T \cdot Q_R \right). \quad (9)$$

Здесь действительная часть представляет собой кватернион поворота $Q_R = \left(\cos \frac{\theta}{2}, u_X \sin \frac{\theta}{2}, u_Y \sin \frac{\theta}{2}, u_Z \sin \frac{\theta}{2} \right)$, а дуальная — произведение кватернионов поворота Q_R и сдвига $Q_T = (0, t_X, t_Y, t_Z)$.

Прямая в плюккеровых координатах задается в виде пары векторов (\mathbf{l}, \mathbf{m}) [12], где вектор \mathbf{l} характеризует направление, а $\mathbf{m} = \mathbf{p} \times \mathbf{l}$ (векторное произведение координат точки \mathbf{p} и прямой \mathbf{l}).

С использованием кватернионов прямая в плюккеровых координатах записывается в виде

$$L = ((0, l_x, l_y, l_z), (0, m_x, m_y, m_z)). \quad (10)$$

При этом преобразование прямой из одной системы координат в другую с использованием дуального кватерниона σ выполняется аналогично (8), но комбинированное комплексно-дуальное сопряжение (7) заменяется на комплексное (3):

$$L' = \sigma L \sigma^*. \quad (11)$$

Для того чтобы прямые пересекались, необходимо выполнение следующего условия:

$$\langle l, m' \rangle + \langle m, l' \rangle = 0. \quad (12)$$

Идея работы состоит в том, чтобы определить параметры поворота и сдвига камер в глобальной системе координат непосредственно по заданным соответствующим точкам видов, используя дуальные кватернионы в качестве инструмента описания этих параметров.

Описание метода

Даны два набора соответствующих точек на изображениях $P = (u_i, v_i)$, $P' = (u'_i, v'_i)$, где (u_i, v_i) и (u'_i, v'_i) — координаты этих точек на первом и втором изображениях соответственно. При известной матрице внутренних параметров камеры \mathbf{K} координаты пикселов изображений (u_i, v_i) , (u'_i, v'_i) могут быть преобразованы в координаты (x_i, y_i) и (x'_i, y'_i) на плоскости проекций первой и второй камер, соответственно, с использованием следующего преобразования:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \mathbf{K}^{-1} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}.$$

Далее в работе будут использоваться именно эти координаты.

В координатах каждой камеры плюккеровы координаты прямой, проходящей через центр $(0, 0, 0)$ и точку $(x, y, 1)$, представляются следующим образом: $L = ((0, x, y, 1), (0, 0, 0, 0))$ и $L' = ((0, x', y', 1), (0, 0, 0, 0))$ — для первой и второй камер соответственно.

Рассмотрим координаты прямой, проходящей через центр первой камеры и точку на плоскости ее проекции, в системе координат, связанной со второй камерой. Эти координаты запишутся в следующем виде:

$$L'' = \sigma L \sigma^* = \sigma((0, x, y, 1), (0, 0, 0, 0)) \sigma^*,$$

где σ — искомый дуальный кватернион поворота и сдвига $\sigma = ((a, b, c, d), (\alpha, \beta, \gamma, \delta))$.

Обозначим $v = (0, x, y, 1)$, тогда

$$\begin{aligned} L'' &= \sigma((0, x, y, 1), (0, 0, 0, 0)) \sigma^* = \\ &= (p + \epsilon q)v(p^* + \epsilon q^*) = (pvp^*, pvv^* + qvp^*). \end{aligned}$$

Поскольку в координатах второй камеры прямые L' и L'' должны пересекаться, зададим функцию $f(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta)$ и применим условие пересечения прямых (13):

$$\begin{aligned} f(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) &= \\ &= \langle pvp^*, (0, 0, 0, 0) \rangle + \langle pvv^* + qvp^*, (0, x', y', 1) \rangle = 0 \end{aligned}$$

или, после упрощения,

$$f(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = \langle pvv^* + qvp^*, (0, x', y', 1) \rangle = 0. \quad (13)$$

Для N точек формируется N уравнений:

$$\begin{cases} f_1(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0; \\ f_2(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0; \\ \dots \\ f_N(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Чтобы избежать ситуации, когда сдвиг оказывается нулевым, добавляется $(N + 1)$ -е уравнение $f_{N+1}(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0$, удовлетворяющее условию $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 + \delta^2 = 1$:

$$\begin{cases} f_1(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0; \\ f_2(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0; \\ \dots \\ f_N(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0; \\ f_{N+1}(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 0. \end{cases} \quad (15)$$

В итоге, задача определения параметров сдвига и поворота сводится к решению полученной системы нелинейных уравнений.

Построение вычислительной процедуры

Рассмотрим общий вид функции $f_i(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta)$ с учетом того, что $v = -v^*$:

$$\begin{aligned} f_i(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) &= \\ &= \langle pvv^* + qvp^*, (0, x', y', 1) \rangle = \\ &= \langle pvv^* - qv^*p^*, (0, x', y', 1) \rangle = \\ &= \langle pvv^* - (pvv^*)^*, (0, x', y', 1) \rangle. \end{aligned}$$

Пусть $pvq^* = (w_0, w_1, w_2, w_3)$, тогда

$$\begin{aligned} f_i(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) &= \\ &= w_1x' + w_2y' + w_3 - (-w_1x' - w_2y' - w_3) = \\ &= 2w_1x' + 2w_2y' + 2w_3 = 2 \cdot \langle pvq^*, (0, x', y', 1) \rangle. \end{aligned}$$

Таким образом, несмотря на то что $pvq^* + qvp^* \neq 2pvq^*$, функцию $f_i(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta)$ можно представить в более простом виде:

$$f_i(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = 2 \cdot \langle pvq^*, (0, x', y', 1) \rangle. \quad (16)$$

Поскольку вектор правых частей равен нулю, множитель перед скалярным произведением может быть убран. По той же причине параметр a может быть задан равным 1. Это предположение нарушает общность задачи только в случае, когда на самом деле $a = 0$ (в остальных случаях он может быть отмасштабирован до любого произвольного значения). Однако $a = 0$ только в случае, когда $\theta/2 = 90^\circ$, т. е. угол съемки между двумя камерами равен 180° . Таких условий не может возникнуть в задаче построения трехмерной модели, поэтому этот случай может быть проигнорирован.

Таким образом, введена новая функция:

$$g_i(a, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta) = f_i(1, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta). \quad (17)$$

Для решения системы (15) будет использоваться метод Ньютона для многомерного случая. Для этого функции $f_i(1, b, c, d, \alpha, \beta, \gamma, \delta)$ раскладываются в ряд Тейлора до членов первого порядка включительно по всем входящим в нее переменным:

$$\begin{aligned} &g_1(b^k, c^k, d^k, \alpha^k, \beta^k, \gamma^k, \delta^k) + \\ &+ \frac{\partial g_1}{\partial b^k} \Delta b^k + \frac{\partial g_1}{\partial c^k} \Delta c^k + \frac{\partial g_1}{\partial d^k} \Delta d^k + \\ &+ \frac{\partial g_1}{\partial \alpha^k} \Delta \alpha^k + \frac{\partial g_1}{\partial \beta^k} \Delta \beta^k + \frac{\partial g_1}{\partial \gamma^k} \Delta \gamma^k + \frac{\partial g_1}{\partial \delta^k} \Delta \delta^k = 0; \\ &g_2(b^k, c^k, d^k, \alpha^k, \beta^k, \gamma^k, \delta^k) + \\ &+ \frac{\partial g_2}{\partial b^k} \Delta b^k + \frac{\partial g_2}{\partial c^k} \Delta c^k + \frac{\partial g_2}{\partial d^k} \Delta d^k + \\ &+ \frac{\partial g_2}{\partial \alpha^k} \Delta \alpha^k + \frac{\partial g_2}{\partial \beta^k} \Delta \beta^k + \frac{\partial g_2}{\partial \gamma^k} \Delta \gamma^k + \frac{\partial g_2}{\partial \delta^k} \Delta \delta^k = 0; \\ &\dots \\ &g_N(b^k, c^k, d^k, \alpha^k, \beta^k, \gamma^k, \delta^k) + \\ &+ \frac{\partial g_N}{\partial b^k} \Delta b^k + \frac{\partial g_N}{\partial c^k} \Delta c^k + \frac{\partial g_N}{\partial d^k} \Delta d^k + \\ &+ \frac{\partial g_N}{\partial \alpha^k} \Delta \alpha^k + \frac{\partial g_N}{\partial \beta^k} \Delta \beta^k + \frac{\partial g_N}{\partial \gamma^k} \Delta \gamma^k + \frac{\partial g_N}{\partial \delta^k} \Delta \delta^k = 0; \\ &g_{N+1}(b^k, c^k, d^k, \alpha^k, \beta^k, \gamma^k, \delta^k) + \\ &+ \frac{\partial g_{N+1}}{\partial b^k} \Delta b^k + \frac{\partial g_{N+1}}{\partial c^k} \Delta c^k + \frac{\partial g_{N+1}}{\partial d^k} \Delta d^k + \\ &+ \frac{\partial g_{N+1}}{\partial \alpha^k} \Delta \alpha^k + \frac{\partial g_{N+1}}{\partial \beta^k} \Delta \beta^k + \frac{\partial g_{N+1}}{\partial \gamma^k} \Delta \gamma^k + \frac{\partial g_{N+1}}{\partial \delta^k} \Delta \delta^k = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Рассмотрим вид частных производных для каждого из аргументов для $i = 1, N$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial g_i}{\partial b^k} = \langle p_1 vq^{k*}, (0, x', y', 1) \rangle; \\ \frac{\partial g_i}{\partial c^k} = \langle p_2 vq^{k*}, (0, x', y', 1) \rangle; \\ \frac{\partial g_i}{\partial d^k} = \langle p_3 vq^{k*}, (0, x', y', 1) \rangle; \\ \frac{\partial g_i}{\partial \alpha^k} = \langle p^k vq_0^*, (0, x', y', 1) \rangle; \\ \frac{\partial g_i}{\partial \beta^k} = \langle p^k vq_1^*, (0, x', y', 1) \rangle; \\ \frac{\partial g_i}{\partial \gamma^k} = \langle p^k vq_2^*, (0, x', y', 1) \rangle; \\ \frac{\partial g_i}{\partial \delta^k} = \langle p^k vq_3^*, (0, x', y', 1) \rangle, \end{array} \right.$$

где

$$\begin{aligned} q_0 &= (1, 0, 0, 0), p_1 = q_1 = (0, 1, 0, 0), \\ p_2 = q_2 &= (0, 0, 1, 0), p_3 = q_3 = (0, 0, 0, 1), \\ p^k &= (1, b^k, c^k, d^k), q^k = (\alpha^k, \beta^k, \gamma^k, \delta^k). \end{aligned}$$

Последнее уравнение в системе отличается от остальных и имеет вид:

$$g_{N+1}(b^k, c^k, d^k, \alpha^k, \beta^k, \gamma^k, \delta^k) + 2b^k \Delta b^k + 2c^k \Delta c^k + 2d^k \Delta d^k + 2\alpha^k \Delta \alpha^k + 2\beta^k \Delta \beta^k + 2\gamma^k \Delta \gamma^k + 2\delta^k \Delta \delta^k = 0.$$

Полученная система позволяет решить исходную задачу итеративно, посредством задания начальных значений $b^0, c^0, d^0, \alpha^0, \beta^0, \gamma^0, \delta^0$, а затем решения системы (18) на каждой итерации относительно $\Delta b^k, \Delta c^k, \Delta d^k, \Delta \alpha^k, \Delta \beta^k, \Delta \gamma^k, \Delta \delta^k$ и пересчета

$$\begin{aligned} b^{k+1} &= b^k + \Delta b^k, c^{k+1} = c^k + \Delta c^k, d^{k+1} = d^k + \Delta d^k, \\ \alpha^{k+1} &= \alpha^k + \Delta \alpha^k, \beta^{k+1} = \beta^k + \Delta \beta^k, \\ \gamma^{k+1} &= \gamma^k + \Delta \gamma^k, \delta^{k+1} = \delta^k + \Delta \delta^k. \end{aligned}$$

В текущей реализации в качестве начальных значений выбираются

$$b^0 = c^0 = d^0 = 0, \alpha^0 = 1, \beta^0 = \gamma^0 = \delta^0 = 0.$$

Экспериментальные исследования

Для проверки точности и надежности разработанной вычислительной процедуры был проведен эксперимент по установлению взаимосвязи ошибки входных данных (координат точек на плоскостях камер) и погрешности полученных оценок поворота и сдвига.

Были заданы следующие параметры поворота и сдвига:

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{\pi}{6}, \\ \mathbf{\hat{u}} &= (1; -4; 3) \\ (t_X, t_Y, t_Z) &= (-1; 6; 5). \end{aligned}$$

Исходные значения X , Y , Z для моделирования задавались в следующих пределах:

$$X \in [-1,5; 1,5], Y \in [-1,5; 1,5], Z \in [0,75; 3,75].$$

На основе исходных значений X , Y , Z были рассчитаны координаты на обоих изображениях. Исходные данные для экспериментов задавались на основе вычисленных координат на изображениях с добавлением шума. Отношение пикового сигнала к шуму принимало значения от 25 до 45 дБ с шагом 5 дБ, а число исходных точек выбиралось равным 20, 50, 150 и 500. Каждый эксперимент проводили 1000 раз. Результат определения поворота считали верным, если отношение нормы вектора погрешности к норме вектора параметров не превосходило 0,2. Результат определения поворота считали верным, если угол между рассчитанным и истинным векторами сдвига не превышал 10° . Для верных результатов было найдено среднее значение погрешности, а также процент верных результатов среди всех попыток. В табл. 1—3 приведены результаты сравнения метода определения параметров камеры, предложенного в данной работе (с использованием дуальных кватернионов, "ДК"), и метода, использующего фундаментальную матрицу ("ФМ"), предложенного Хартли.

Таблица 1
Точность определения поворота

Отношение сигнал-шум, дБ	Число точек							
	20		50		150		500	
	ДК	ФМ	ДК	ФМ	ДК	ФМ	ДК	ФМ
25	0,0390	0,0392	0,0218	0,0217	0,0112	0,0126	0,0073	0,0101
30	0,0227	0,0240	0,0109	0,0113	0,0057	0,0063	0,0033	0,0041
35	0,0118	0,0140	0,0057	0,0063	0,0031	0,0032	0,0016	0,0019
40	0,0066	0,0079	0,0031	0,0034	0,0017	0,0018	0,0009	0,0010

Таблица 2
Точность определения сдвига (°)

Отношение сигнал-шум, дБ	Число точек							
	20		50		150		500	
	ДК	ФМ	ДК	ФМ	ДК	ФМ	ДК	ФМ
25	4,354	5,253	2,841	3,831	1,490	2,850	0,910	2,459
30	2,912	3,794	1,470	1,996	0,769	1,218	0,425	0,862
35	1,603	2,326	0,783	1,065	0,406	0,564	0,217	0,359
40	0,884	1,394	0,420	0,567	0,226	0,310	0,121	0,167

Таблица 3

Число верных результатов определения параметров камер (%)

Отношение сигнал-шум, дБ	Число точек							
	20		50		150		500	
	ДК	ФМ	ДК	ФМ	ДК	ФМ	ДК	ФМ
25	79,2	72,3	98,4	96,2	100,0	100,0	100,0	100,0
30	95,4	93,3	100,0	99,8	100,0	100,0	100,0	100,0
35	98,8	99,7	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
40	99,1	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Для полученных значений был рассчитан процент результатов, для которых и сдвиг, и поворот были определены верно.

Заключение

Выбранная модель преобразования координат разноракурсных изображений, основанная на представлении трехмерных изображений и параметров съемки в виде дуальных кватернионов, позволила разработать новый, более точный и надежный по сравнению с традиционным, метод определения неизвестных параметров камер. Этот метод был реализован в виде программы на языке C++. С использованием разработанной программы проведен эксперимент по установлению взаимосвязи ошибки входных данных (координат точек на плоскостях камер) и погрешности полученных оценок поворота и сдвига. В ходе экспериментальных исследований было подтверждено, что качество определения параметров в большинстве случаев превосходит качество результатов, полученных методом, использующим фундаментальную матрицу.

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук, профессору В. А. Фурсову за конструктивное обсуждение и ряд важных замечаний при подготовке настоящей работы.

Список литературы

1. Caldini A., Fanfani M., Colombo C. Smartphone-Based Obstacle Detection for the Visually Impaired // Image Analysis and Processing—ICIAP 2015. Springer International Publishing, 2015. P. 480—488.
2. Callow N., Leopold M., May S. M. Surface and sub-surface anatomy of the landscape: integrating Unmanned Aerial Vehicle Structure from Motion (UAV-SfM) and Ground Penetrating Radar (GRP) to investigate sedimentary features in the field.—an example from NW Australia // EGU General Assembly Conference Abstracts. 2015. Т. 17. P. 8621.
3. Hesse R. Combining structure-from-motion with high and intermediate resolution satellite images to document threats to archaeological heritage in arid environments // Journal of Cultural Heritage. 2015. Т. 16. № 2. P. 192—201.
4. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision // Cambridge university press. 2003. 271 p.
5. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 928 с.
6. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П. и др. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.
7. Csurka G., Zeller C., Zhang Z., Faugeras O. Characterizing the uncertainty of the fundamental matrix // Computer Vision and Image Understanding. 1997. Vol. 68 (1). P. 18—36.
8. Hartley R. I. In defence of the 8-point algorithm // Proc. of the 5th International Conference on Computer Vision (Boston, MA, June). 1995. P. 1064—1070.
9. Гошин Е. В., Фурсов В. А. Реконструкция 3D-сцен по разноракурсным изображениям при неизвестных внешних параметрах съемки // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39, № 5. С. 770—776.
10. Karlsson L., Tisseur F. Algorithms for hessenberg-triangular reduction of fiedler linearization of matrix polynomials // Society for Industrial and Applied Mathematics. 2015. С. 384—414.
11. Smith M. Applications of Dual Quaternions in Three Dimensional Transformation and Interpolation. 2013. N. 11. P. 6—14.
12. Schwartz S. E. Development of the kinematic model for an ultrasound scanning machine by means of dual quaternion transformations of screw coordinates // Massachusetts institute of technology. 1989. P. 8—13.

A Method for Determination of the Extrinsic Camera Parameters from a Pair of Images with the Use of Dual Quaternions

Ye. V. Goshin^{1, 2}, goshine@yandex.ru , I. R. Useinova¹, inessa.useinova@gmail.com,

¹ Samara National Research University, Samara, 443086, Russian Federation,

² Image Processing Systems Institute, RAS, Branch of Crystallography and Photonics, RAS, Samara, 443001, Russian Federation

Corresponding author: Goshin Yegor V., Ph. D., Associate Professor, Samara National Research University, Samara, 443086, Russian Federation, Image Processing Systems Institute, RAS, Branch of Crystallography and Photonics, RAS, Samara, 443001, Russian Federation, e-mail: goshine@yandex.ru

Received on September 25, 2016

Accepted on October 14, 2016

Real-world problems associated with the use of the moving vehicles present a problem for estimation of the unknown motion parameters on the basis of the data obtained from a static camera set on the surface of those vehicles. The initial data (in absence of information about the vehicle motion) are the images obtained from different viewpoints. The traditional approach to estimation of the rotation and translation parameters, which consists in determination of the so-called fundamental matrix and the subsequent calculation of the required matrices has several drawbacks. In particular, if the largest portion of the predefined points in the images is located on the same plane, the fundamental matrix estimation involves serious errors, which, in turn, lead to errors in estimation of the camera parameters. Unlike in the traditional approach, in this paper the corresponding points are used to estimate not the fundamental matrix, but the internal and external camera parameters directly. Besides, this paper presents a multiple view geometry model, based on three-dimensional images and camera parameters in the form of dual quaternions. The proposed approach to the problem is a new method of estimation of the unknown camera parameters, which is more accurate and reliable compared with the traditional one. This method was implemented as a program in C++. Using the developed program, the authors carried out an experiment to establish a correlation between the errors in the input data (points of coordinates on the planes of the camera) and the errors in the estimated rotation and translation parameters. As the result, it was confirmed that the accuracy of the parameters' estimation in most cases surpasses the quality of the results obtained by using the fundamental matrix.

Keywords: multiple views, external camera parameters, dual quaternions, Pluecker coordinates, estimation

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Project № 16-07-00729 a).

For citation:

Goshin Ye. V., Useinova I. R. A Method for Determination of the Extrinsic Camera Parameters from a Pair of Images with the Use of Dual Quaternions, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 4, pp. 279–284.

DOI: 10.17587/mau.18.279-284

References

1. Caldini A., Fanfani M., Colombo C. Smartphone-Based Obstacle Detection for the Visually Impaired, *Image Analysis and Processing—ICIAP 2015*, Springer International Publishing, 2015, pp. 480–488.
2. Callow N., Leopold M., May S. M. Surface and sub-surface anatomy of the landscape: integrating Unmanned Aerial Vehicle Structure from Motion (UAV-SfM) and Ground Penetrating Radar (GRP) to investigate sedimentary features in the field.—an example from NW Australia, *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2015, vol. 17, pp. 8621.
3. Hesse R. Combining structure-from-motion with high and intermediate resolution satellite images to document threats to archaeological heritage in arid environments, *Journal of Cultural Heritage*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 192–201.
4. Hartley R., Zisserman A. *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge university press, 2003, 271 p.
5. Forsyth D. A., Ponce J. *Computer vision: a modern approach*, Prentice Hall, 2002, 720 p.
6. Gruzman I. S., Kirichuk V. S., Kosyh V. P. et al. *Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v informacionnyh sistemah: uchebnoe posobie* (Digital Image Processing in Information Systems: Tutorial), Novosibirsk, Publishing house of NGTU, 2002, 352 p.
7. Csurka G., Zeller C., Zhang Z., Faugeras O. Characterizing the uncertainty of the fundamental matrix, *Computer Vision and Image Understanding*, 1997, vol. 68 (1), pp. 18–36.
8. Hartley R. I. In defence of the 8-point algorithm. In *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision (Boston, MA, June)*, 1995, pp. 1064–1070.
9. Goshin Ye. V., Fursov V. A. 3D scene reconstruction from stereo images with unknown extrinsic parameters, *Computer Optics*, 2015, vol. 39, no. 5, pp. 770–776.
10. Karlsson L., Tisseur F. Algorithms for hessenberg-triangular reduction of fiedler linearization of matrix polynomials, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2015, pp. 384–414.
11. Smith M. Applications of Dual Quaternions in Three Dimensional Transformation and Interpolation, 2013, vol. 11, pp. 6–14.
12. Schwartz S. E. Development of the kinematic model for an ultrasound scanning machine by means of dual quaternion transformations of screw coordinates, *Massachusetts institute of technology*, 1989, pp. 8–13.

А. С. Девятисильный, д-р техн. наук, проф., devyatis@iacp.dvo.ru,

А. К. Стоценко, мл. науч. сотр., stotsenko@iacp.dvo.ru,

Института автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Исследование относительного продольного движения автомобилей в системе "лидер—ведомый"¹

Рассматривается аналитическое конструирование моделей управлений линейным движением автомобилей, проведено теоретико-механическое исследование продольного движения одиночного автомобиля и пары автомобилей с использованием парадигмы конструктивной математики. Введено понятие заданного (программного) движения; исследуемое относительное движение представлено в отклонениях от программного. Рассмотрен ряд возможных моделей управления относительным движением.

Ключевые слова: движение, скорость, расстояние, транспортный поток, транспортная единица, управление, обратная связь, модель, функция Ляпунова, конструктивная математика

Введение

В будущем практически неизбежна автоматизация управления транспортом, в частности автомобилями, в связи с чем значимой становится задача обеспечения безопасности совместного движения пилотируемых и роботизированных транспортных единиц (далее — ТЕ). Так, возникает необходимость в создании моделей взаимодействия автомобилей в линейном потоке. Заметим, что для предотвращения дорожно-транспортных происшествий принципиально важно моделировать управление движением, достаточно детально описывая силы, которые действуют на автомобиль, что делает недостаточно пригодными для этих целей макроскопические (например, гидродинамические [1]) модели транспортного потока и ряд микроскопических моделей, включая популярные в настоящее время клеточные автоматы [2].

Данная работа, как и ранее опубликованная статья [3], посвящена управлению движением автомобилей в линейном потоке. Построение моделей движения в настоящей работе выполняется под влиянием парадигмы конструктивной математики [4], в неявной форме высказанной в работе [5], развивает представление о моделях управления как о моделях теоретико-механических, в достаточно полной мере отражающих физический смысл движения, причем модель вполне адекватна с точки зрения целей управления движением.

Модели продольного движения одиночной ТЕ

В качестве исходной модели продольного движения отдельно взятой ТЕ массой m возьмем модель, близкую предложенной в работе [3], а именно:

$$\begin{aligned}\dot{R} &= V, R(0) = R_0; \\ \dot{V} &= F - S - g_v, V(0) = V_0; S = A + Q; \\ \dot{F} &= -\mu(F - \varphi_d(V_d) + u + T), F(0) = F_0,\end{aligned}\quad (1)$$

¹ Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН № 15-1-4-006 О (Программа "Дальний Восток").

где R — расстояние, пройденное ТЕ; V — линейная скорость движения ТЕ, причем $V \geq 0$ (т.е. рассматриваем одностороннее движение); F, S — удельные силы (далее — силы): F — сила, создаваемая двигателем-тормозной системой ТЕ, S — сила сопротивления движению; $A = kV^2$ — сила аэродинамического сопротивления; k — фактор обтекаемости, $k = 0,5c\rho$, c — коэффициент лобового сопротивления, ρ — плотность воздуха, $\sigma = \alpha BH/m$ — удельная лобовая площадь ТЕ, α — коэффициент заполнения лобовой площади, B и H — наибольшие ширина и высота ТЕ; Q — значение силы сопротивления качению, $Q = f_q g_h$ при $V > 0$, g_h и g_v — проекции ускорения свободного падения (g) соответственно на направление движения и направление, ему ортогональное (далее примем $g_v = 0$, так что $g_h = g$), f_q — коэффициент сопротивления качению; T — сила торможения; $V_d = V_d(t)$ — задаваемая скорость движения ТЕ; $\varphi_d(V_d)$ — сила, реализующая задаваемое (или программное) движение; $\mu = \tau^{-1}$, τ — постоянная времени реализации силы F , вообще говоря, возможен случай $\mu = \mu(t)$, хотя в данной работе принимается $\mu = \text{const}$; u — дополнительная управляющая сила (далее — просто управление), корректирующая движение.

Модель (1) корректна с момента времени трогания ТЕ с места, принимаемого за $t = 0$, при $F(0) \geq Q$ и $V > 0$. Функция $\varphi_d(V_d)$ определяется при $u \equiv 0$ и $T \equiv 0$. Примем, что коэффициенты k, f_q, μ известны точно, и введем следующие соотношения: $V = V_d + v$, $F = F_d + f$, $A = A_d + a$, $Q = Q_d$, где F_d, A_d, Q_d — значения сил, соответствующие заданному движению; дополнительно замечаем, что $a = A - A_d = kV^2 - kV_d^2 = k(V + V_d)v$, или, полагая $k(V + V_d) = \eta$, $a = \eta v$. Тогда уравнения движения ТЕ в отклонениях от заданного движения примут вид

$$\begin{aligned}\dot{r} &= v, r(0) = r_0; \\ \dot{v} &= -\eta v + f, v(0) = v_0; \\ \dot{f} &= -\mu(f + u + T), f(0) = f_0.\end{aligned}\quad (2)$$

Учитывая линейность модели (2), ее можно привести к виду

$$\begin{aligned}\dot{r} &= v, r(0) = r_0; \\ \dot{v} &= -\eta v + f - T_1, v(0) = v_0; \\ \dot{f} &= -\mu(f + u), f(0) = f_0,\end{aligned}\quad (3)$$

где $T_1 = e^{-\mu t} \int_{t_1}^t \mu T(\theta) e^{\mu \theta} d\theta$, или, если $T = \text{const} > 0$,

то $T_1 = T(1 - e^{-\mu(t-t_1)})$; если же системы (2) и (3) рассматривать при $t \geq t_1 + 3\tau$, где $\tau = \mu^{-1}$, то логично принять $T_1 = T$.

Очевидно, что системы (2) и (3) эквивалентны. Добавим к этому, что наблюдаемым и управляемым вектором состояний рассматриваемой модели движения при доступности измерений скорости $v = V - V_d$ является, что легко проверить, вектор (v, f) ; поэтому в этом разделе статьи при ссылках на соотношение (2) и (3) будем иметь в виду только вторые и третьи уравнения систем, а именно:

- для системы (2)

$$\begin{aligned}\dot{v} &= -\eta v + f, v(0) = v_0; \\ \dot{f} &= -\mu(f + u + T), f(0) = f_0;\end{aligned}$$

- для системы (3)

$$\begin{aligned}\dot{v} &= -\eta v + f - T_1, v(0) = v_0; \\ \dot{f} &= -\mu(f + u), f(0) = f_0.\end{aligned}$$

Если проблема наблюдения (оценивания) вектора $(v, f)^\top$ решена, то, формируя управление в виде $u = \mu_0 f + \gamma v$, можно изменять динамические свойства системы, в частности, значение времени формирования силы, движущей ТЕ (μ_0 и γ — коэффициенты, в общем случае — функции времени).

Наряду с эквивалентными моделями (2) и (3) укажем еще и на приближенную модель вида

$$\begin{aligned}\dot{v} &= -\eta v - u - T, v(0) = v_0, u = \gamma v \\ \text{или } \dot{v} &= -(\eta + \gamma)v - T, v(0) = v_0,\end{aligned}\quad (4)$$

полагая ее допустимость при достаточно большом значении μ , т.е. весьма малом значении $\tau = \mu^{-1}$, или, по сути, при $\mu > \eta$ (например, для легкового автомобиля с массой $m = 1000$ кг и лобовой площадью $2,6 \text{ м}^2$ имеет место значение $\eta = 0,605$, в то время как при $\tau = 0,1$ с $\mu = 10$ и, очевидно, $10 \gg 0,605$).

Исследуем теперь проблему приведения значения v к значению $v = 0$ при $t \rightarrow 0$ с целью выявить области значений параметра γ в управлении $u = \gamma v$, иначе говоря, проблему асимптотической устойчивости систем (2), (3), (4) с последующим сравнением условий устойчивости.

Начнем с модели (4). Учитывая однодиаправленность движения ТЕ ($V \geq 0$), замечаем (полагая $T \equiv 0$), что для асимптотической устойчивости (4) необходимо и достаточно, чтобы

$$\gamma > -\eta. \quad (5)$$

О влиянии на устойчивость силы T (напомним: $T = \text{const} > 0$ при $V \geq 0$) будем судить по тому, как меняется во времени кинетическая энергия движения, или функция Ляпунова $L = v^2/2$, с которой в данном случае она отождествляется. Имеем $\dot{L} = v\dot{v} = -(\eta + \gamma)L - vT$, откуда видим что наибольший эффект от торможения имеет место только тогда, когда оно реализуется на временных интервалах, на которых $v > 0$.

Продолжим исследование, обращаясь теперь к моделям (2) и (3). Возьмем для них функцию Ляпунова в виде квадратичной формы $L = (v:f)P(v:f)^\top$ с матрицей $P = \text{diag}(1, p) = \text{const}$, $p > 0$. Тогда для рассматриваемых моделей движения получим следующие выражения производной функции Ляпунова:

$$\bullet \text{ для (2): } \dot{L} = \psi(v, f) - fT; \quad (6)$$

$$\bullet \text{ для (3): } \dot{L} = \psi(v, f) - vT, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned}\psi(v, f) &= -2\eta p v^2 + 2(p - \mu\gamma)vf - 2\mu f^2 = \\ &= (v:f)W(v:f)^\top,\end{aligned}\quad (8)$$

$$W = \begin{pmatrix} -2\eta p & p - \mu\gamma \\ p - \mu\gamma & -2\mu \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Пусть $T \equiv 0$, т.е. реализуется движение без торможения. Тогда для того чтобы при $t \rightarrow \infty$ имело место $v \rightarrow 0$, с достаточностью требуется выполнение неравенства $\psi(v, f) < 0$, т.е. условия отрицательной определенности матрицы W . Сначала отметим, что простой взгляд на функцию $\psi(v, f)$ указывает на возможную область значений γ , а именно:

$$\gamma > 0, \quad (10)$$

при этом следует указать значение $p > 0$, т.е. $p = \mu\gamma$, и, таким образом, верифицировать $\psi(v, f)$ как функцию Ляпунова.

Сравнивая теперь области (5) и (10), находим их заметное различие в пользу первой, более соответствующей физической сущности процесса диссипации кинетической энергии при аэродинамических силах сопротивления движению.

Подробнее условия выполнения требования $\psi(v, f) < 0$ рассмотрим, исследуя определенность матрицы W (9); ее характеристическое уравнение и собственные числа имеют следующий вид:

$$\lambda^2 = 2(\mu + \eta p)\lambda + 4\mu\eta p - (p - \mu\gamma)^2 = 0; \quad (11)$$

$$\lambda_{1,2} = -(\mu + \eta p) \pm ((\mu + \eta p) - 4\mu\eta p + (p - \mu\gamma)^2)^{1/2}. \quad (12)$$

Из соотношения (12) находим, что $\lambda_{1,2} < 0$, т.е. матрица W отрицательно определена, если $4\mu\eta p > (p - \mu\gamma)^2$, или $\pi(p, \gamma) = p^2 - 2p(2\mu\eta + \mu\gamma) + \mu^2\gamma^2 < 0$.

В свою очередь, корни уравнения $\pi(p, \gamma) = 0$ есть

$$\begin{aligned}p_{1,2} &= \mu(2\eta + \gamma) \pm \mu((2\eta + \gamma)^2 - \gamma^2)^{1/2} = \\ &= \mu(2\eta + \gamma) \pm 2\mu\sqrt{\eta(\eta + \gamma)},\end{aligned}$$

а условие их вещественности

$$\gamma \geq -\eta \quad (13)$$

одновременно определяет область значений γ , на которой существуют значения p : $0 < p < p_1 = \mu(2\eta + \gamma) +$

$+ 2\mu\sqrt{\eta(\eta + \gamma)}$ когда $\lambda_1, \lambda_2 < 0$ и, следовательно, $\psi(v, f) < 0$.

Сравнивая теперь области (5) и (13), отмечаем их практическое совпадение, что вполне оправдывает модель (4). Наконец, обращаясь к выражениям (6) и (7) при $T > 0$, находим, что эффект от торможения достигается только тогда, когда оно реализуется либо при $v > 0$, либо при $f > 0$; более того, второе выполняется одновременно с первым, что следует из эквивалентности уравнений (2) и (3).

Модель относительного продольного движения двух ТЕ

Полагаем, что при продольном движении двух ТЕ, впередиущей (TE_1) и следующей за ней позади (TE_2), составляющих пару, или звено ТЕ, ставится задача достижения и сохранения между ними заданного расстояния (d_0). При этом роль лидера, или ведущего, определяющего цели и соответствующий им характер движения пары может быть отведена как TE_1 , так и TE_2 . Тогда в первом случае формирования звена из двух ТЕ ответственность за решение указанной задачи возлагается на TE_2 , а во втором — на TE_1 ; заметим, что наряду с этим ответственность может быть возложена на обе ТЕ одновременно.

Рассмотрим первый случай, наиболее соответствующий реалиям движения транспорта, когда TE_1 — лидер.

Учитывая, что движение лидера, по сути, является заданным для ведомого (TE_2), для описания относительного движения ТЕ можно воспользоваться моделями (2), (3) или (4), несколько адаптируя их к исследуемой задаче, а именно, вводя следующие обозначения: $v = V - V_d$ — скорость относительного движения ТЕ; V_d и V — соответственно скорости TE_1 и TE_2 ; $\eta = k(V + V_d)$; k и μ — коэффициенты модели ординарного движения TE_2 ; $r = R_1 - R_2 - d_0$, R_1 и R_2 — расстояния, проходимые соответственно TE_1 и TE_2 , существенно, что r измеряется бортовыми средствами TE_2 ; принимая во внимание наблюдаемость (при измерении r) и управляемость моделей (2), (3), (4), положим $u = \beta r + \gamma v$, где β и γ — коэффициенты, определение области значений которых, обуславливающей процесс $(r, v) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$, и является основной целью дальнейшего исследования. Таким образом, речь идет об исследовании асимптотической устойчивости моделей относительного движения.

Вместе с тем, результаты исследования ординарного движения вполне убедительно указывают на то, что и в случае движения пары ТЕ возможно обращение к адаптированной модели вида (4), а именно

$$\begin{aligned}\dot{r} &= v, \quad r(0) = r_0; \\ \dot{v} &= -\beta r - (\eta + \gamma)v - T, \quad v(0) = v_0,\end{aligned}\quad (14)$$

где T — сила торможения, реализуемая TE_2 , причем либо $T \equiv 0$, либо $T \geq 0$, если $V \geq 0$.

Легко видеть, что в стационарном случае, когда $\beta = \text{const} > 0$ и $\eta + \gamma = \text{const} > 0$, система асимптотически устойчива (при $T \equiv 0$).

Покажем, когда это имеет место в общем случае, доказав, что полная энергия относительного движения

$$E = 0,5v^2 + \beta r^2, \quad (15)$$

где первое слагаемое — кинетическая энергия, а второе — потенциальная, является функцией Ляпунова, т.е. $L = E$ для модели (14). Итак, дифференцируя уравнение (15), имеем

$$\dot{E} = -2D - vT + 0,5\dot{\beta}r^2, \quad (16)$$

где $D = (\eta + \gamma)v^2/2$ — функция рассеивания Релея.

Пусть $T \equiv 0$. Тогда $L = E$, 1) если $\beta = \text{const} > 0$, $\gamma > -\eta$; 2) если $\beta(t) > 0$, $\gamma > -\eta$, $\dot{\beta}r^2 < 4D$.

Заметим, что еще один способ организации обратной связи (по скорости), как это видно из соотношения (16), может быть реализован в виде ситуационного управления торможением TE_2 , когда торможение "включается" только на тех временных интервалах, на которых $v > 0$, т.е. $vT > 0$, повышая, таким образом, скорость убывания энергии E , что может привести к расхождению ТЕ по дальности или же к автоколебаниям, нарушающим режим комфорта движения TE_2 .

Рассмотрим и другие способы формирования совместного связанного движения двух ТЕ (звено ТЕ). Пусть роль лидера в паре играет позади идущая TE_2 . Тогда для TE_1 движение TE_2 является заданным. Именуя теперь в определении v (т.е. $v = V - V_d$) скорости V и V_d как скорости, соответственно, TE_1 и TE_2 , приходим к тем же уравнениям (14), что и в случае, когда роль лидера отводилась TE_1 . Более того, к этим же уравнениям приходим и тогда, когда обе ТЕ одновременно решают задачу формирования звена; при этом $\beta = \beta_1 + \beta_2$, $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$, $\eta = \eta_1 + \eta_2 = (k_1 + k_2)(V_1 + V_2)$, $T = T_1 + T_2$, где индексы при параметрах указывают на их соответствие TE_1 и TE_2 .

Обобщая изложенное, отметим следующее. Простой комбинаторный анализ, выполненный с учетом результатов исследования для случая, когда в качестве лидера рассматривалась TE_1 , указывает, что из 15 возможных сочетаний параметров из множества $(\beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2)$ только 12 способны обеспечить асимптотическую устойчивость относительного движения ТЕ; назовем оставшиеся из них (с общим для всех трех условием $\beta = \beta_1 = \beta_2 = 0$), которые не обеспечивают сходимость управляемого процесса к состоянию $(v = 0, r = 0)$, но обеспечивают сходимость процесса к состоянию $v = 0$, а именно: 1) $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$; 2) $\gamma = \gamma_1$; 3) $\gamma = \gamma_2$, где $\gamma > 0$. Это обобщение при $T \equiv 0$ легко верифицируется по виду уравнений (14).

Заключение

В представленной работе рассмотрен ряд моделей управления относительным движением, существенным свойством которых является представление относительного движения как отклонения от заданного (программного) движения. Рассмотрены модели движения одиночного автомобиля и пары

автомобилей; представленная модель движения пары автомобилей применима для моделирования линейного потока автомобилей как последовательности пар. В исследовании использован метод функций Ляпунова [6], что обеспечивает достаточные условия устойчивости.

Список литературы

1. **Дрю Д.** Теория транспортных потоков и управление ими. М.: Транспорт, 1972.

2. **Тоффоли Т., Марголус Н.** Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991.

3. **Девятисильный А. С., Стоценко А. К.** Модели управления относительным движением двух сухопутных транспортных единиц в задаче следования за лидером // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 6. С. 426–431.

4. **Марков А. А.** Избранные труды. Т. II. Теория алгоритмов и конструктивная математика, математическая логика, информатика и смежные вопросы. М.: Изд-во МЦНМО, 2003.

5. **Филимонов Н. Б.** Методологический кризис "всепобеждающей математизации" современной теории управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 5. С. 291–301.

6. **Малкин И. Г.** Теория устойчивости. М.: Наука, 1966.

Research of the Relative Longitudinal Vehicle Motion for the Leader-Follower System

A. S. Devyatilny, devyatis@iacp.dvo.ru, **A. K. Stotsenko**, stotsenko@iacp.dvo.ru,

Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: **Devyatilny Aleksandr S.**, Ph. D., Professor,

Head of the Navigation and Control Department, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of RAS, Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: devyatis@iacp.dvo.ru

Received on July 22, 2016

Accepted on August 10, 2016

Prospects for the self-driven vehicles and the existing adaptive cruise-control systems for vehicles put more and more stringent requirements to the longitudinal motion control models. The authors believe that one of the key targets in the contemporary studies is development and research of the motion models suitable for the robot-aided vehicles, showing the difference between the piloted, semi-automated and automated control models. This article is devoted to the theoretical mechanical models of the guided longitudinal motion of vehicles. Such models, precise and robust, are essential for analyzing and construction of complex transportation system models. The article is mainly devoted to the design of the analytical models of the linear movement of the vehicles' control; theoretical and mechanical studies of the longitudinal motion of a single car and a pair of cars are carried out, a paradigm of the constructive mathematics is used. Notably, a traffic flow is introduced as a chain of the vehicle "couples", since their motion is longitudinal. A new approach to the coupled vehicles' movement, taking into account the velocity, acceleration and dynamic parameters of the transport units, is introduced. The article presents a concept of a predetermined (program) motion; the relative vehicles' motion is presented in the deviations from a predetermined motion. Possible relative motion control models are introduced. Ways of keeping the required mode of the coupled movement for different types of control are considered. The asymmetry of the control options for different vehicles is detected and studied.

Keywords: motion, velocity, distance, traffic flow, transport unit, control, feed-back coupling, model, constructive mathematics

Acknowledgements: This work was supported by FEB RAS grant № 15-1-4-006 O (Far East Program).

For citation:

Devyatilny A. S., Stotsenko A. K. Research of the Relative Longitudinal Vehicle Motion for the Leader-Follower System, *Mekhanika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no 4, pp. 285–288.

DOI: 10.17587/mau.17.285-288

References

1. **Dryu D.** *Teoriya transportnyh potokov i upravlenie imi* (Theory of traffic flow and traffic flow management), Moscow, Transport, 1972 (in Russian).

2. **Toffoli T., Margolus N.** *Mashiny kletochnyh avtomatov* (Machines of cellular automates), Moscow, Mir, 1991 (in Russian).

3. **Devyatilny A. S., Stotsenko A. K.** *Modeli upravleniya otносительным движением двух сухопутных транспортных единиц в задаче следования за лидером* (Models of Terrestrial Transport Motion for a Group of Two Units in Terms of the Leader-Following Problem), *Mekhanika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 6, pp. 426–431 (in Russian).

4. **Markov A. A.** *Izbrannye trudy. T. II. Teoriya algoritmov i konstruktivnaya matematika, matematicheskaya logika, informatika i smezhnye voprosy* (Selected works. T. II. The theory of algorithms and constructive mathematics, mathematical logic, computer science and related matters), Moscow, MCNMO publishing house, 2003 (in Russian).

5. **Filimonov N. B.** *Metodologicheskij krisis "vsepopbezdayushchej matematizacii" sovremennoj teorii upravleniya* (Methodological Crisis of the "All Winning Mathematization" of the Modern Control Theory), *Mekhanika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 5, pp. 291–301 (in Russian).

6. **Mal'kin I. G.** *Teoriya ustojchivosti* (Stability Theory), Moscow, Nauka, 1966 (in Russian).

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Строгинский 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 31.01.2017. Подписано в печать 14.03.2017. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН417 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 "Адвансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Рисунки к статье О. Н. Корсун, С. В. Николаева, Б. К. Поплавского
 «АЛГОРИТМЫ ПРОВЕРКИ ПРАВИЛЬНОСТИ ПОЛЕТНЫХ ДАННЫХ
 И ОЦЕНИВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ ПРИ ИДЕНТИФИКАЦИИ
 АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ САМОЛЕТОВ»

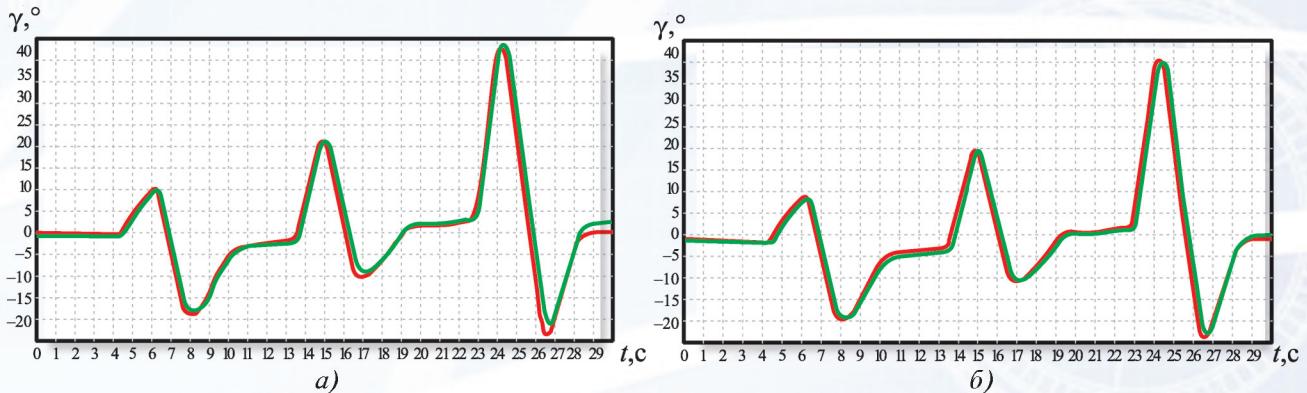


Рис. 3. Сравнение измеренного в полете (красная линия) и вычисленного в модели (зеленая линия) углов крена до (а) и после (б) компенсации постоянных погрешностей датчиков угловых скоростей и перегрузок

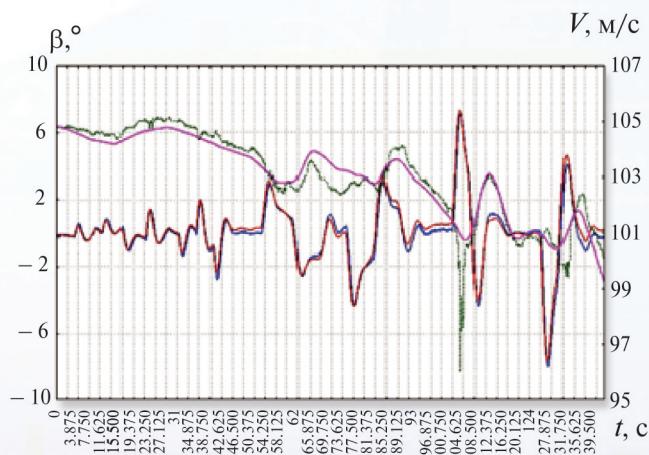


Рис. 4. Сходимость смоделированных и измеренных сигналов угла скольжения и воздушной скорости

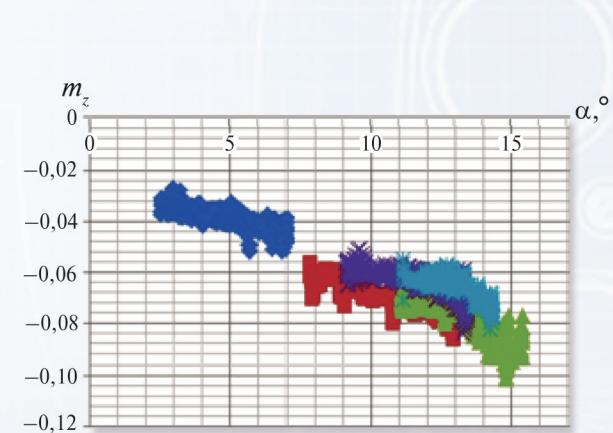


Рис. 5. Результаты идентификации зависимости $m_z(\alpha)$ при разбиении по участкам, конфигурация 1

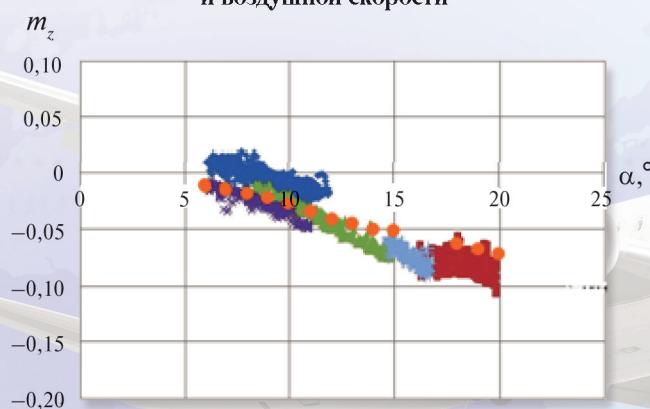


Рис. 6. Сравнение полученных оценок коэффициента момента тангажа с данными банка аэродинамических характеристик, конфигурация 2

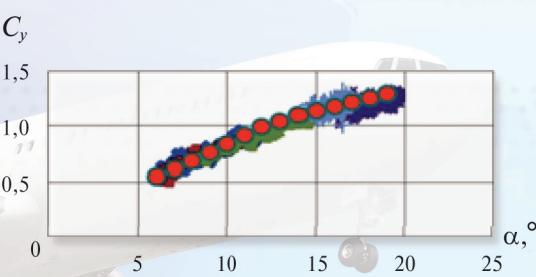
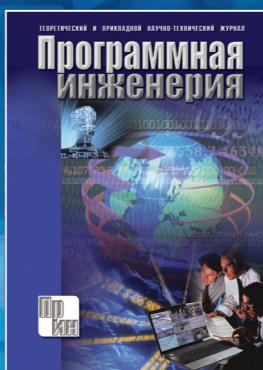


Рис. 7. Сравнение полученных по семи участкам оценок коэффициента подъемной силы с данными банка аэродинамических характеристик

Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ” выпускает научно-технические журналы

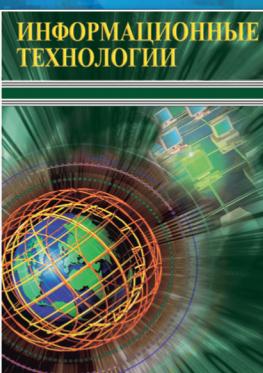


Теоретический и прикладной научно-технический журнал

ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

В журнале освещаются состояние и тенденции развития основных направлений индустрии программного обеспечения, связанных с проектированием, конструированием, архитектурой, обеспечением качества и сопровождением жизненного цикла программного обеспечения, а также рассматриваются достижения в области создания и эксплуатации прикладных программно-информационных систем во всех областях человеческой деятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 22765; «Пресса России» – 39795

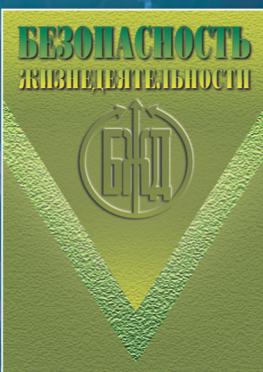


Ежемесячный теоретический и прикладной
научно-технический журнал

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития основных направлений в области разработки, производства и применения информационных технологий.

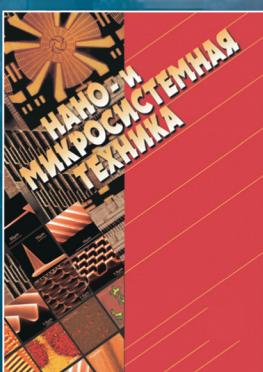
Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 72656; «Пресса России» – 94033



Научно-практический и учебно-методический журнал
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ

В журнале освещаются достижения и перспективы в области исследований, обеспечения и совершенствования защиты человека от всех видов опасностей производственной и природной среды, их контроля, мониторинга, предотвращения, ликвидации последствий аварий и катастроф, образования в сфере безопасности жизнедеятельности.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79963; «Пресса России» – 94032



Ежемесячный междисциплинарный
теоретический и прикладной научно-технический журнал

НАНО- и МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА

В журнале освещаются современное состояние, тенденции и перспективы развития нано- и микросистемной техники, рассматриваются вопросы разработки и внедрения нано- и микросистем в различные области науки, технологии и производства.

Подписные индексы по каталогам: «Роспечать» – 79493; «Пресса России» – 27849

Все журналы
распространяются
только по подписке.

Оформить подписку можно
через подписные агентства
либо непосредственно
в редакции журналов.

Адрес редакции журналов для авторов и подписчиков:

107076, Москва, Стромынский пер., 4. Издательство “НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ”

Тел.: (499) 269-55-10, 269-53-97. Факс: (499) 269-55-10.

E-mail: antonov@novtex.ru