Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 72

12
2018

Главный редактор

Микрин Е.А. – д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Афанасьев В.Н. – д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Ван Мэйлин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Иванов А.П. – д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Кларк Р. – д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)
Криони Н.К. – д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. – д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. – д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. – д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. – д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. – д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. – ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. – генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли – д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. – д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн – д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. – д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. – д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. – д.э.н., проф., Кошалинский политехн. ин-т (Польша)

Редакторы — **Мымрина И.Н., Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.
Тел.: 8 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г. (ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Шашурин В.Д., Селезнева М.С., Клычников В.В., Лукьянова Н.В., Неусыпин К.А., Дьяченко И.Л. Анализ погрешностей проведения измерений конструкций судов 531

Мончарж Э.М., Песков Н.П. Системная автоматизация процесса ректификационного разделения смеси этаноламинов . . 536

Куликов И.Н., Колесник Л.Л. Исследование влияния компоновки модулей многокластерного технологического комплекса на общую производительность установки с использованием имитационного моделирования 542

Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Сусский А.В. Разработка информационно-измерительного канала мониторинга процесса низкотемпературного плазменного упрочнения . . 546

Пустозеров Р. В., Юрьева Р.А., Анисимов И.В., Тулькова И.А. Описание метода определения осевой жёсткости деталей роликовых винтовых передач 550

Горбунов А.А., Балакин А.В., Микаева С.А. Исследование характеристик специальных люминесцентных ламп для подсветки аквариумов в сравнении с традиционными люминесцентными лампами 553

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Шэнь К., Лу В., Сюетин Ч. Алгоритмы обработки информации инерциальных навигационных систем 555

Преснова А.П. Оптимальное и субоптимальное управление нелинейным объектом с использованием метода расширенной линеаризации 563

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 570

Указатель статей, опубликованных в журнале «Автоматизация. Современные технологии» в 2018 г. 571

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2018

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 72 12/2018

Chief in Editor

Mikrin E.A. – dr.en.s., prof., academician of the RAS, RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev

EDITORIAL COUNCIL:

Afanasyev V.N. – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Ivanov A.P. – dr.ec.s., prof., MSURE (MIIT)
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MSUPI
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Putilov V.N. – LLC «Publishing "Innovative machine building"» (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Publishing "Innovative mashine building"»
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician RAS, President of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science and Technology, P.R. China
Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS, MSTU behalf of N.E. Bauman
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center behalf of V.P. Chkalov
Yanovich E.A. – dr.ec.s., prof., Koszalin Polytechnic. Ins., Poland

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**
Computer layout — **Konova E.V.**

Editorial address:
107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7 (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

Founder:

LLC «SCIENTIFIC AND TECHNICAL PUBLISHING "INNOVATIVE MACHINE BUILDING"»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Shashurin V.D., Selezneva M.S., Klychnikov V.V., Lukyanova N.V., Neusypin K.A., Dyachenko I.L. Analysis of measurement errors in vessel designs . . . 531

Moncharzh E.M., Peskov N.P. System automation of the rectification separation process of the ethanolamines mixture . . . 536

Kulikov I.N., Kolesnik L.L. Investigation of the modules layout influence of a multicluster technological complex on the overall performance of the installation by using simulation modelling simulation . . . 542

Brzhozovskiy B.M., Martynov V.V., Susskiy A.V. Development of an information-measuring channel for monitoring the process of low-temperature plasma hardening . . . 546

Pustozerov R.V., Yureva R.A., Anisimov I.V., Tulkova I.A. Description of the method for determining the axial rigidity of parts for roller helical transmission . . . 550

Gorbunov A.A., Balakin A.V., Mikaeva S.A. Investigation of the special fluorescent lamps characteristics for illuminating aquariums in comparison with traditional fluorescent lamps . . . 553

MODERN TECHNOLOGIES

Klychnikov V.V., Selezneva M.S., Neusypin K.A., Proletarskiy A.V., Shen K., Lu V., Syuetin C. Algorithms for information processing of inertial navigation systems . . . 555

Presnova A.P. Optimum and suboptimal control of a nonlinear object by using the method of extended linearization . . . 563

REVIEW OF THE PERIODICAL PRESS

On the journals pages . . . 570

Index of articles published in the journal «Automation. Modern Technologies» in 2018 . . . 571

© Publishing «Innovative machine building», «Automation. Modern technologies», 2018

УДК 681.513

В.Д. Шашурин, д-р техн. наук, проф., **М.С. Селезнева,** канд. техн. наук,
В.В. Клычников, Н.В. Лукьянова, канд. техн. наук, доц.,
К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **И.Л. Дьяченко,** д-р экон. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

m.s.selezneva@mail.ru

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОНСТРУКЦИЙ СУДОВ

Рассмотрены способы контроля положения конструкций судов при проведении работ в доках. Исследованы погрешности аппаратуры при проведении измерений конструкторских параметров судов. Получены формализованные зависимости погрешностей измерения от параметров используемых измерителей.

Ключевые слова: теодолит; погрешности измерений; док; преддоковая площадка.

The ways of monitoring the position of ship structures during work in docks are considered. The equipment inaccuracies during measurements of vessel design parameters are investigated. Formalized dependences of measurement inaccuracy on the parameters of the utilized measuring instruments are obtained.

Keywords: theodolite; measurement inaccuracy; dock; predocks ground.

Введение. Контроль изготовления судовых конструкций осуществляется посредством определения пространственных координат характерных точек модулей секций и блоков. Координаты характерных точек определяются в единой системе координат, связанной с доком.

Для определения характерных точек можно использовать два альтернативных подхода.

Первый подход связан с построением опорной геодезической сети на преддоковой площадке. Данный подход является традиционным и достаточно прост в реализации. К недостаткам можно отнести снижение надёжности сети в условиях отсутствия сплошной видимости и возможность возникновения технологических трудностей, связанных с неравномерностью проведения монтажных работ.

Второй подход предполагает определение координат характерных точек без построения опорной сети. Координаты характерных точек определяются прямыми засечками с изолированными друг от друга базисами [1].

К преимуществам такого подхода следует отнести возможность проведения измерений с произвольных удобных точек и отсутствие ошибок измерения, связанных с геодезической сетью преддоковой площадки. Недостатками являются необходимость проведения большого числа измерений, что вызывает увеличение случайных погрешностей измерений в единой системе координат.

Способы проведения измерений. Рассмотрим погрешности, возникающие при проведении измерений. Определение погрешностей проведём в рамках первого подхода к измерению координат характерных точек.

Введём в рассмотрение систему координат xyz, жёстко связанную с доком, и систему координат $x_1y_1z_1$, связанную с кораблём. Система координат $x'y'z'$ параллельна системе xyz, но начало координат расположено в точке O_1. Система координат $x_1y_1z_1$ отклонена относительно системы $x'y'z'$ на углы φ, ϑ, γ. На рис. 1 показано расположение систем координат.

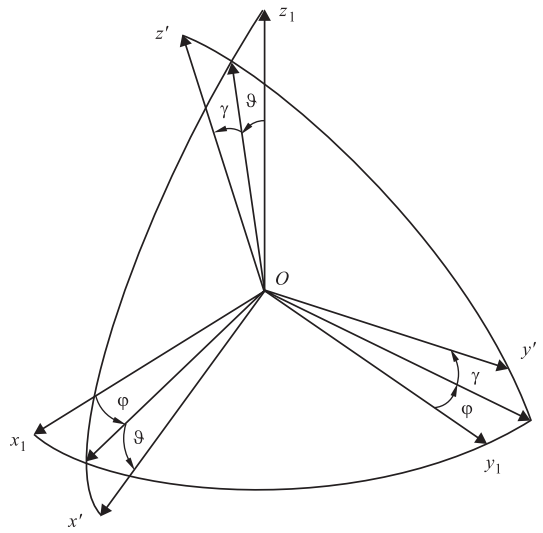


Рис. 1. Расположение систем координат

Введём матрицу направляющих косинусов Ф для перехода от систем координат $x_1y_1z_1$ и $x'y'z'$:

$$\Phi = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix}.$$

Эта связь имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

Переход от системы координат $x_1y_1z_1$ (связанной с кораблём) к системе xyz, связанной с доком, осуществляется зависимостями вида

$$\begin{aligned} x &= l_1x_1 + l_2y_1 + l_3z_1 + a; \\ y &= m_1x_1 + m_2y_1 + m_3z_1 + b; \\ z &= n_1x_1 + n_2y_1 + n_3z_1 + c. \end{aligned} \qquad (1)$$

Теодолит перемещается по преддоковой площадке и при измерении занимает положение с координатами $x_0y_0z_0$, которые определяются с помощью геодезической сети. Положение теодолита n в системе координат показано на рис. 2.

Углы φ и A определяются геометрическими соотношениями вида

$$\mathrm{tg}A = \frac{y - y_0}{x - x_0};$$

$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{z - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}};$$

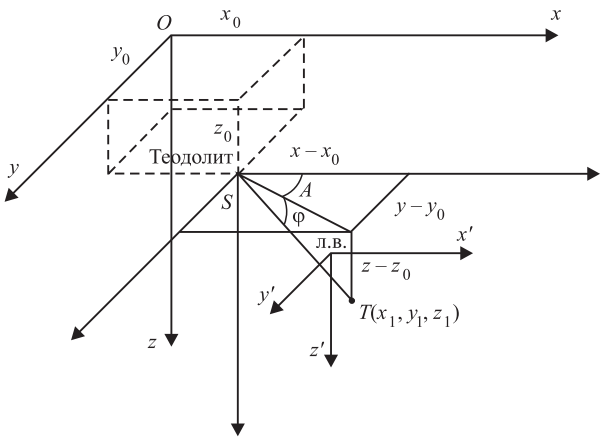


Рис. 2. Положение теодолита в системе координат: T — точка расположения теодолита; S — характерная точка; л.в. — линия визирования теодолита; φ, A — углы, определяющие положение линии визирования

$$A = \mathrm{arctg}\,\frac{y - y_0}{x - x_0};$$

$$\varphi = \mathrm{arctg}\,\frac{z - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}.$$

Наведение двух теодолитов в одну точку S на пересечении линий визирования материализует эту точку. Точка S задаётся размерами по чертежу, положением корабля относительно дока (a, b, c), направляющими косинусами l_i, m_i, n_i и положениями теодолитов относительно дока (x_0, y_0, z_0).

Погрешности проведения измерений. Зададим малые приращения углов φ, A и представим их в виде дифференциалов:

$$dA = \frac{\dfrac{(x - x_0)dy + (y - y_0)dx}{(x - x_0)^2}}{1 + \left[\dfrac{(y - y_0)}{(x - x_0)}\right]^2} = \frac{(x - x_0)dy + (y - y_0)dx}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2};$$

$$d\varphi = \frac{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}dz - \dfrac{(z - z_0)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}(x - x_0)dy + (y - y_0)dx}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}.$$

Перейдём к конечным приращениям:

$$\Delta A = \frac{1}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \times [(x - x_0)\Delta y + (y - y_0)\Delta x] + \delta T;$$

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \times \left\{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}\Delta z - \frac{z - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \times [(x - x_0)\Delta x + (y - y_0)\Delta y]\right\} + \delta T,$$

где Δx, Δy, Δz — рассчитываются либо по накопленной статистике, либо по формулам, приведённым ниже; δT — погрешность самого теодолита в определении углов.

Координаты положения теодолита x_0, y_0, z_0 могут быть измерены с ошибками Δx_0, Δy_0, Δz_0. Ошибки возникают из-за ограниченной ви-

димости, погрешностей нанесения геодезической сети на преддоковую площадку и др. При использовании второго подхода к определению характерных точек данные ошибки обусловлены неточностью проведения измерений и малыми областями перекрытия (малым количеством «общих точек»).

Параметры ΔA и $\Delta\varphi$ рассчитываются по формулам

$$\Delta A = \delta T + \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}\times$$
$$\times[(x-x_0)\Delta y+(y-y_0)\Delta x];$$

$$\Delta\varphi = \delta T + \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}\times$$
$$\times\left\{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}\Delta z - \frac{z-z_0}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}\times\right.$$
$$\left.\times[(x-x_0)\Delta x+(y-y_0)\Delta y]\right\}.$$

Погрешность теодолита в заданном угле визирования точки S имеет вид

$$\Delta = \sqrt{(\Delta A)^2+(\Delta\varphi)^2}.$$

Таким образом, погрешности измерения можно записать в следующей форме:

$$\Delta x = \Delta a + l_1\Delta x_1 + x_1\Delta l_1 + l_2\Delta y_1 + y_1\Delta l_2 +$$
$$+ l_3\Delta z_1 + z_1\Delta l_3;$$
$$\Delta y = \Delta b + m_1\Delta x_1 + x_1\Delta m_1 + m_2\Delta y_1 + y_1\Delta m_2 +$$
$$+ m_3\Delta z_1 + z_1\Delta m_3;$$
$$\Delta z = \Delta c + n_1\Delta x_1 + x_1\Delta n_1 + n_2\Delta y_1 + y_1\Delta n_2 +$$
$$+ n_3\Delta z_1 + z_1\Delta n_3.$$

Анализируя эти выражения, можно сформулировать рекомендации по уменьшению погрешностей проведения измерений.

Значения направляющих косинусов зависят от углов между соответствующими осями и порядка отклонения углов. Примем следующий порядок отклонения углов: $\psi \to \vartheta \to \gamma$ (см. рис. 1).

В соответствии с рис. 1 определим матрицу направляющих косинусов:

$$\begin{vmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{vmatrix}.$$

Для перехода от системы координат $x_1y_1z_1$ к системе $x'y'z'$

$$\begin{vmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{vmatrix}\begin{vmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{vmatrix}.$$

Переход от системы $x_1y_1z_1$ (корабль) к системе xyz (док) осуществляется зависимостями

$$x = l_1x_1 + l_2y_1 + l_3z_1 + a;$$
$$y = m_1x_1 + m_2y_1 + m_3z_1 + b;$$
$$z = n_1x_1 + n_2y_1 + n_3z_1 + c.$$

Теодолит может перемещаться по доку и при измерении занимать положение в доке с координатами $x_0y_0z_0$:

$$\mathrm{tg}A = \frac{y-y_0}{x-x_0};$$
$$\mathrm{tg}\varphi = \frac{z-z_0}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}};$$
$$A = \mathrm{arctg}\frac{y-y_0}{x-x_0};$$
$$\varphi = \mathrm{arctg}\frac{z-z_0}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}.$$

Наведение двух теодолитов в одну точку T на пересечении линий визирования материализует эту точку. Точка T задаётся в алгоритме размерами по чертежу, положение корабля относительно дока (a, b, c) — направляющими косинусами $l_im_in_i$ и положениями теодолитов относительно дока $x_0y_0z_0$.

Координаты положения теодолитов x_0, y_0, z_0 могут быть измерены с ошибками Δx_0, Δy_0, Δz_0, поэтому ΔA и $\Delta\varphi$ будут рассчитываться по формулам

$$\Delta A = \delta T + \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}\times$$
$$\times[(x-x_0)(\Delta y-\Delta y_0)+(y-y_0)(\Delta x-\Delta x_0)];$$
$$\Delta\varphi = \delta T + \frac{1}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2}}\times$$
$$\times\left\{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}(\Delta z-z_0) -\right.$$
$$-\frac{z-z_0}{\sqrt{(x-x_0)^2+(y-y_0)^2}}\times$$
$$\left.\times[(x-x_0)(\Delta x-\Delta x_0)+(y-y_0)(\Delta y-\Delta y_0)]\right\};$$

$\Delta = \sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta\varphi)^2}$ — погрешность теодолита в заданном угле визирования точки T;

$$\Delta x = \Delta a + l_1\Delta x_1 + x_1\Delta l_1 + l_2\Delta y_1 + y_1\Delta l_2 + l_3\Delta z_1 + z_1\Delta l_3;$$
$$\Delta y = \Delta b + m_1\Delta x_1 + x_1\Delta m_1 + m_2\Delta y_1 + y_1\Delta m_2 + m_3\Delta z_1 + z_1\Delta m_3;$$
$$\Delta z = \Delta c + n_1\Delta x_1 + x_1\Delta n_1 + n_2\Delta y_1 + y_1\Delta n_2 + n_3\Delta z_1 + z_1\Delta n_3.$$

Погрешности в определении направляющих косинусов:

$$\Delta n_2 = \cos\psi\sin\vartheta\cos\gamma\Delta\psi + \sin\psi\cos\vartheta\cos\gamma\Delta\vartheta - \sin\psi\sin\vartheta\sin\gamma\Delta\gamma; \quad (2)$$
$$\Delta n_3 = -\sin\psi\cos\gamma\Delta\vartheta - \cos\vartheta\sin\gamma\Delta\gamma.$$

Перейдём от дифференциалов к конечным значениям погрешностей в определении направляющих косинусов:

$$\Delta l_1 = -\sin\psi\cos\vartheta\Delta\psi - \cos\psi\sin\vartheta\Delta\vartheta;$$
$$\Delta l_2 = \cos\psi\cos\vartheta\Delta\varphi - \sin\psi\sin\vartheta\Delta\vartheta;$$
$$\Delta l_3 = -\cos\vartheta\Delta\vartheta;$$
$$\Delta m_1 = -\cos\psi\cos\gamma\Delta\psi + \sin\psi\sin\gamma\Delta\gamma;$$
$$\Delta m_2 = -\sin\psi\cos\gamma\Delta\psi - \cos\psi\cos\gamma\Delta\gamma - \cos\psi\cos\vartheta\sin\gamma\Delta\psi + \sin\psi\cos\vartheta\sin\gamma\Delta\vartheta + \sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma\Delta\gamma;$$
$$\Delta m_3 = \sin\vartheta\sin\gamma\Delta\vartheta + \cos\vartheta\cos\gamma\Delta\gamma;$$
$$\Delta n_1 = -\sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma\Delta\psi + \cos\psi\cos\vartheta\cos\gamma\Delta\vartheta - \cos\psi\sin\vartheta\sin\gamma\Delta\gamma + \cos\psi\sin\gamma\Delta\psi + \sin\psi\cos\gamma\Delta\gamma;$$
$$\Delta n_2 = \cos\psi\sin\vartheta\cos\gamma\Delta\psi + \sin\psi\cos\vartheta\cos\gamma\Delta\vartheta - \sin\psi\sin\gamma\Delta\gamma;$$
$$\Delta n_3 = -\sin\vartheta\cos\vartheta\Delta\vartheta - \cos\vartheta\sin\gamma\Delta\gamma,$$

где φ, ϑ, γ — углы между реперными осями корабля и дока по чертежу.

В случае когда реперные оси корабля и дока по чертежу принимаются коллинеарными, вид погрешностей в измерении направляющих косинусов в значительной степени упрощается:

$$\Delta l_1 = 0; \quad \Delta m_1 = -\Delta\psi; \; \Delta n_1 = \Delta\vartheta;$$
$$\Delta l_2 = \Delta\psi; \; \Delta m_2 = 0; \quad \Delta n_2 = 0; \quad (3)$$
$$\Delta l_3 = 0; \quad \Delta m_3 = \Delta\gamma; \quad \Delta n_3 = 0.$$

Здесь исключены из рассмотрения величины второго и выше порядка малости.

Матрица погрешностей измерений направляющих косинусов $\Delta\Phi$ в этом случае принимает следующий вид:

$$\Delta\Phi = \begin{bmatrix} 0 & \Delta\psi & 0 \\ -\Delta\psi & 0 & \Delta\gamma \\ \Delta\vartheta & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Матрица направляющих косинусов $\Delta\Phi$ в рассматриваемом случае будет иметь вид

$$\Delta\Phi = \begin{bmatrix} 1 & \Delta\psi & -\Delta\vartheta \\ -\Delta\psi & 1 & \Delta\gamma \\ \Delta\vartheta & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Подставляя значения заданных направляющих косинусов и погрешностей в их определении в выражения для координат точки S на корабле относительно дока (Δx, Δy, Δz) получим

$$\Delta x = \Delta a + \Delta x_1 + \Delta y_1\Delta\psi - y_1\Delta\psi - \Delta z_1\Delta\vartheta;$$
$$\Delta y = \Delta b - \Delta x_1\Delta\psi - x_1\Delta\psi + \Delta y_1 + \Delta z_1\Delta\gamma + z_1\Delta\gamma; \quad (6)$$
$$\Delta z = \Delta c + \Delta x_1\Delta\vartheta + x_1\Delta\vartheta + \Delta z_1.$$

Значения направляющих косинусов зависят от величин углов между соответствующими осями и порядка отклонений. Примем следующий порядок отклонений: $\psi \to \vartheta \to \gamma$ (см. рис. 1):

$$l_1 = \cos\psi\cos\vartheta;$$
$$l_2 = \sin\psi\cos\vartheta;$$
$$l_3 = -\sin\vartheta;$$
$$m_1 = -\sin\psi\cos\gamma + \cos\psi\sin\vartheta\sin\gamma;$$
$$m_2 = \cos\psi\cos\gamma + \sin\psi\sin\vartheta\sin\gamma + \cos\vartheta\sin\gamma;$$
$$m_3 = \cos\vartheta\sin\gamma;$$
$$n_1 = \cos\psi\sin\vartheta\cos\gamma + \sin\psi\sin\gamma;$$
$$n_2 = \sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma;$$
$$n_3 = \cos\vartheta\cos\gamma.$$

Для определения погрешностей при измерении направляющих косинусов продифференцируем величины направляющих косинусов:

$$dl_1 = -\sin\psi\cos\vartheta\Delta\psi - \cos\psi\sin\vartheta\Delta\vartheta;$$
$$dl_2 = \cos\psi\cos\vartheta\Delta\varphi - \sin\psi\sin\vartheta\Delta\vartheta;$$
$$dl_3 = -\cos\vartheta\Delta\vartheta;$$
$$dm_1 = -\cos\psi\cos\gamma\Delta\psi + \sin\psi\sin\gamma\Delta\gamma;$$
$$dm_2 = -\sin\psi\cos\gamma\Delta\psi - \cos\psi\cos\gamma\Delta\gamma - \cos\psi\cos\vartheta\sin\gamma\Delta\psi + \sin\psi\cos\vartheta\sin\gamma\Delta\vartheta + \sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma\Delta\gamma;$$

$dm_3 = -\sin\vartheta\sin\gamma\Delta\vartheta + \cos\vartheta\cos\gamma\Delta\gamma;$

$dn_1 = -\sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma\Delta\psi + \cos\psi\cos\vartheta\cos\gamma\Delta\vartheta -$
$- \cos\psi\sin\vartheta\sin\gamma\Delta\gamma + \cos\psi\sin\gamma\Delta\psi + \sin\psi\cos\gamma\Delta\gamma;$

$dn_2 = \cos\psi\sin\vartheta\cos\gamma\Delta\psi + \sin\psi\cos\vartheta\cos\gamma\Delta\vartheta -$
$- \sin\psi\sin\gamma\Delta\gamma;$

$dn_3 = -\sin\vartheta\cos\vartheta\Delta\vartheta - \cos\vartheta\sin\gamma\Delta\gamma.$

Погрешности измерения:

$$A = \operatorname{arctg}\frac{y - y_0}{x - x_0};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{z - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}};$$

$$dA = \frac{\dfrac{(x - x_0)dy + (y - y_0)dx}{(x - x_0)^2}}{1 + \left[\dfrac{y - y_0}{x - x_0}\right]^2} =$$

$$= \frac{(x - x_0)dy + (y - y_0)dx}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2};$$

$$d\varphi = \frac{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}dz -}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{-\dfrac{z - z_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}(x - x_0)dy + (y - y_0)dx}{+ (z - z_0)^2}.$$

Переход к конечным параметрам:

$$\Delta A = \delta T + \frac{1}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \times$$
$$\times [(x - x_0)(\Delta y - \Delta y_0) + (y - y_0)(\Delta x - \Delta x_0)];$$

$$\Delta\varphi = \delta T + \frac{1}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}} \times$$
$$\times \left\{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}\,(\Delta z - z_0) - \right.$$
$$- \frac{(z - z_0)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \times$$
$$\left. \times [(x - x_0)(\Delta x - \Delta x_0) + (y - y_0)(\Delta y - \Delta y_0)]\right\},$$

где δT — погрешность самого теодолита в определении углов.

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} \Delta x &= \Delta a + \Delta x_1 - y_1\Delta\psi - z_1\Delta\vartheta; \\ \Delta y &= \Delta b - x_1\Delta\psi + \Delta y_1 + z_1\Delta\gamma; \\ \Delta z &= \Delta c + x_1\Delta\vartheta + \Delta z_1. \end{aligned} \qquad (7)$$

Заключение. В соответствии с проведённым исследованием получены зависимости (7), позволяющие рассчитать точность определения характерных точек. Для этого паспортные данные конкретного типа измерителя подставляются в системе (7) и, варьируя знаками, определяют максимальные и минимальные значения погрешностей измерения. Предложенный способ оценки точности определения характерных точек не требует использования дорогостоящей аппаратуры [2] и не связан с проведением сложных вычислений [3, 4].

Таким образом, можно определить диапазон точности погрешностей измерения характерных точек и сделать вывод о целесообразности использования конкретной аппаратуры.

Библиографические ссылки

1. **Пельпор Д.С.** Гироскопические системы ориентации и стабилизации. М.: Машиностроение, 1982. 165 с.

2. **Шень К., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.

3. **Шень К., Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Пролетарский А.В.** Разработка метода определения достижимой точности корректируемых навигационных систем // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 9. С. 38—46.

4. **Selezneva M.S., Neusypin K.A.** Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. 2016. Т. 59. № 9. С. 916—922.

Ссылка для цитирования

Шашурин В.Д., Селезнева М.С., Клычников В.В., Лукьянова Н.В., Неусыпин К.А., Дьяченко И.Л. Анализ погрешностей проведения измерений конструкций судов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 12. С. 531—535.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу:
«Пресса России» — индекс **27838**.

УДК 62-5

Э.М. Мончарж, канд. хим. наук, доц., **Н.П. Песков**
(Дзержинский политехнический институт, Нижегородская обл.)

peskov87@bk.ru

СИСТЕМНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СМЕСИ ЭТАНОЛАМИНОВ

Рассмотрена системная модель реинжиниринга системы управления процессом ректификации этаноламинов. Методология разработки модели может стать новым способом проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами. Описаны основные этапы разработки: построение диаграммы бизнес-процесса использования и совершенствования системы управления процессом ректификационного разделения смеси этаноламинов, диаграмм компонентов и развёртывания.

Ключевые слова: системное моделирование; ректификация; этаноламины; управление; диаграммы представления.

The system model of of a control system reengineering for the rectification process of ethanolamines is considered. The methodology of model development can become a new way of designing automated control systems for technological processes. The main stages of the development are described: the business process diagram construction of using and improving the control system for the rectification process separation of the ethanolamines mixture, component diagrams and deployment.

Keywords: system modeling; rectification; ethanolamines; control; representation diagrams.

Используемый подход к разработке систем управления технологическими процессами развит применительно к информационным системам группой Object Management Group на базе унифицированного языка моделирования *UML* [1, 2]. Поскольку автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) значительно отличаются по своему назначению и структуре от информационных систем, указанный подход для приспособления его к разработке АСУТП был расширен в отношении используемых графических моделей (диаграмм). Специфика предлагаемой методики разработки АСУТП проиллюстрирована на конкретном примере автоматизированной системы. Представление предметной области проектируемой системы как диаграммы бизнес-процесса применительно к автоматизируемому технологическому процессу не является достаточным. Кроме диаграммы бизнес-процесса для описания предметной области системы необходимо использовать представление аппаратурной реализации процесса, описание технологии и регламентных ограничений на проведение процесса. Для отражения этой информации в качестве графической модели может быть использована технологическая схема данного процесса (рис. 1).

Трёхкомпонентная смесь этаноламинов, включающая моноэтаноламин (МЭА), диэтаноламин (ДЭА) и триэтаноламин (ТЭА), поступает со стадии синтеза на стадию ректификационного разделения. Соотношение между концентрациями компонентов в смеси определяется режимом работы стадии синтеза и поэтому является переменным во времени. На стадии разделения используются более двух насадочных ректификационных колонн для обеспечения требуемого качества готовой продукции. Применение такого количества ректификационных колонн приводит к повышению энергетических затрат, требуемых для качественного разделения трёхкомпонентной смеси. Таким образом, задача управления процессом разделения состоит в достижении более полного разделения компонентов на каждой стадии для обеспечения требуемого качества каждого из выделяемых из смеси целевых продуктов. Решение этой задачи позволяет довести количество стадий разделения до двух и снизить энергетические затраты процесса разделения. Низкотемпературным компонентом смеси является МЭА, поэтому именно его следует выделить из смеси на первой стадии разделения в качестве дистиллята.

Полнота выделения низкотемпературного компонента в дистиллят оценивается показателем мольной доли этого компонента в дистилляте X_d, значение которого обеспечивается величиной флегмового числа α, определяющего расход флегмы L в зависимости от расхода дистиллята D. Выбором величины α обеспечи-

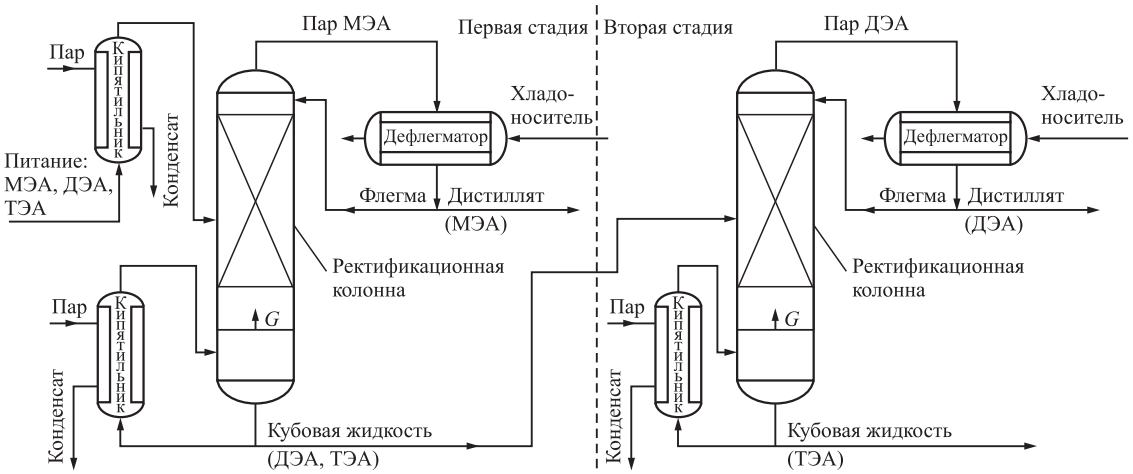


Рис. 1. Технологическая схема процесса разделения смеси этаноламинов

вается требуемое высокое значение X_d, близкое к единице. Для исключения высоких потерь низкотемпературного компонента с кубовой жидкостью необходимо добиться низкого значения мольной доли этого компонента в кубовой жидкости X_w, близкого к нулю. Добиться этого можно путём установления определённого значения расхода дистиллята D. Из уравнений материального баланса колонны ректификации следует уравнение для определения значения требуемого расхода дистиллята

$$D = (X_f - X_w)F/(X_d - X_w), \qquad (1)$$

где D — расход дистиллята, кмоль/ч; X_f — мольная доля низкотемпературного компонента в потоке питания, кмоль/кмоль; X_w — мольная доля низкотемпературного компонента в кубовой жидкости, кмоль/кмоль; F — расход питания, кмоль/ч; X_d — мольная доля низкотемпературного компонента в дистилляте, кмоль/кмоль.

Если в уравнение (1) подставить требуемые значения X_d и X_w, а также фактические значения F и X_f, то величина D, рассчитанная по уравнению (1), определяет расход дистиллята, обеспечивающий требуемое значение X_w. Это значение расхода дистиллята выдаётся в системе управления как задание регулятору расхода дистиллята. Такой метод является управлением по возмущению, поскольку величины F и X_f являются возмущающими воздействиями на управляемый процесс. Критерии эффективного управления на обеих стадиях ректификационного разделения смеси этаноламинов представлены на рис. 2.

Из перечисленных критериев следует содержание задач управления рассматриваемым процессом. Первой задачей управления является выбор флегмового числа α, при котором достигается заданное значение X_d, близкое к единице. Второй задачей управления является определение расхода дистиллята по уравнению (1) при фактических значениях возмущающих воздействий, обеспечивающего заданное значение X_w, близкое к нулю. Значения расхода флегмы и дистиллята связаны следующими соотношениями:

$$L = \alpha D; \qquad (2)$$

$$G = (\alpha + 1)D, \qquad (3)$$

где L — расход флегмы, кмоль/ч; G — производительность кипятильника колонны, кмоль/ч; α — флегмовое число.

Уравнения (2) и (3) позволяют устанавливать требуемые значения L и D путём изменения производительности кипятильника.

Поскольку ранее определены задачи управления, которые должна решать автоматизированная система управления процессом ректи-

Рис. 2. Критерии эффективности управления процессом ректификации

фикационного разделения смеси этаноламинов, то появляется возможность представить диаграмму бизнес-процесса реализации рассматриваемой технологии с использованием АСУТП. В качестве методологии представления данной диаграммы используем *BPMN* [3], принятую в языке *UML*. Действующими участниками этого бизнес-процесса являются: оператор-технолог АСУТП, главный технолог цеха и коллектив специалистов по автоматизации технологических процессов. Работы, выполняемые каждым из участников бизнес-процесса, записываются в их пулах (дорожках). Пул оператора-технолога включает следующие работы: визуализация показателей и параметров технологического процесса с анализом состояния протекания процесса, предупреждением остального персонала об опасности возникновения аварийных ситуаций и передачей ему оперативных сообщений системы управления; контроль соблюдения технологического регламента и принятия мер по устранению его нарушений. Пул оператора-технолога также включает информирование главного технолога цеха о случаях нарушения технологического регламента.

Перечень работ, выполняемых главным технологом цеха по управлению технологическим процессом, включает анализ результатов управленческого учёта расходования производственных ресурсов и разработку мероприятий по снижению их удельного расхода, разработку мероприятий по снижению частоты появления нарушений технологического регламента за счёт расширения функций АСУТП. Кроме того, главный технолог цеха выбирает исполнителей мероприятий, связанных с автоматизацией технологического процесса, и участвует в постановке актуальных задач управления технологическим процессом, направленных на снижение удельного расхода энергетических ресурсов производства.

Специалисты по автоматизации технологических процессов составляют теоретическую модель процесса ректификации и определяют её параметры для первой и второй стадий разделения этаноламинов. Теоретическая модель процесса разделения этаноламинов необходима для оценки эффективности предложенных разработчиками задач управления процессом. Для решения задач управления процессом разделения этаноламинов необходимо составить модель компенсации возмущающих воздействий (изменение расхода и состава питания) путём изменения производительности кипятильника колонны, а также модель самого кипятильника, позволяющую определить давление греющего пара в рубашке кипятильника, при котором достигается заданная производительность кипятильника.

Содержание бизнес-процесса проведения технологического разделения этаноламинов представлено на рис. 3.

Разработанные специалистами по автоматизации технологических процессов при проведении этого бизнес-процесса функциональные схемы управления первой и второй стадиями ректификационного разделения представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

Для повышения оперативности и точности управления процессом обе системы являются комбинированными с компенсацией возмущающих воздействий на базе математических моделей и ряда локальных регуляторов [4]. Локальными средствами, не входящими в состав комбинированных систем управления, являются регуляторы уровней кубовой жидкости и давления обеих ректификационных колонн.

Рис. 3. Бизнес-процесс использования и совершенствования системы управления ректификационным разделением смеси этаноламинов

Функциональные блоки, реализующие модели и используемые для компенсации возмущающих воздействий, обозначены на схемах систем управления следующим образом: М1 — модель расчёта расхода флегмы в зависимости от расхода дистиллята и флегмового числа, корректируемого регулятором состава дистиллята; М2 — модель расчёта производительности кипятильника, обеспечивающего требуемые расходы флегмы и дистиллята; М3 — модель расчёта давления греющего пара в кипятильнике, обеспечивающего заданную производительность; М4 — модель расчёта расхода дистиллята, обеспечивающего требуемый состав кубовой жидкости.

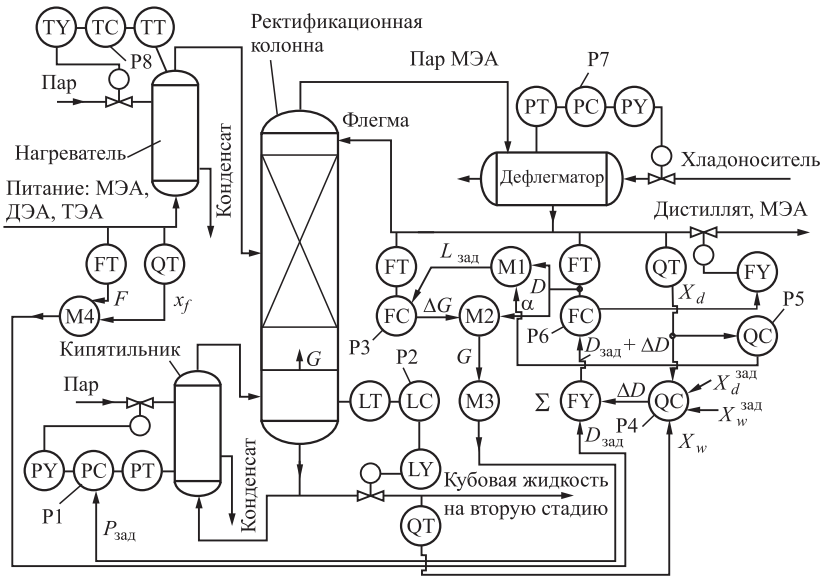


Рис. 4. Функциональная схема управления первой стадией ректификационного разделения смеси этаноламинов

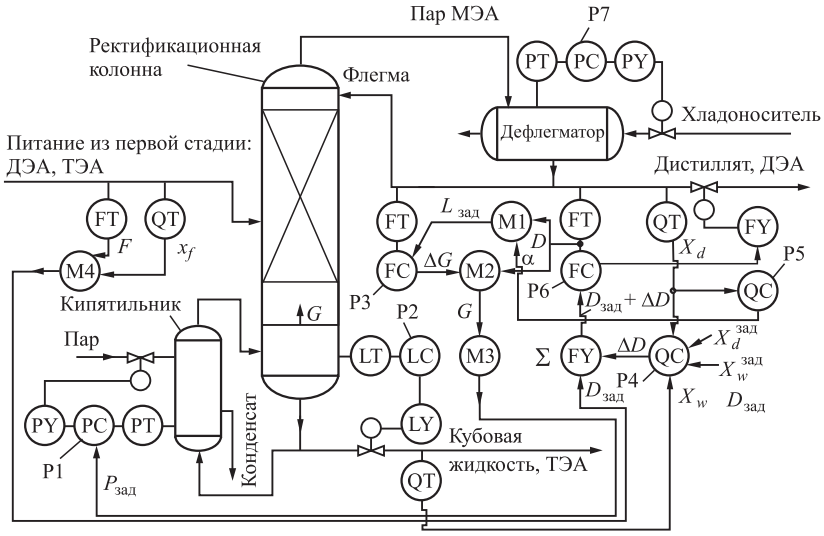


Рис. 5. Функциональная схема управления второй стадией разделения смеси этаноламинов

В состав представленных комбинированных систем управления входят три внутренних регулятора каскадных систем, к которым относятся: регулятор давления греющего пара в рубашке кипятильника Р1 (контур регулирования включает: датчик PT, регулятор PC, исполнительный механизм PY), получающий задание от функционального блока М3; регулятор расхода флегмы Р3, получающий задание от функционального блока М1 в зависимости от расхода дистиллята и флегмового числа; регулятор расхода дистиллята Р6, получающий задание от функционального блока М4 в зависимости от расхода и состава потока питания колонны. Управление отклонением в рассматриваемой комбинированной системе управления выполняется нечётким регулятором Р4 [5], поскольку отклонение, характеризующееся двумя технологическими параметрами X_d и X_w, регулируется изменением одной величины расхода дистиллята. Управляющие воздействия по возмущению и отклонению в рассматриваемой комбинированной системе управления суммируются. Регулятор Р5 в составе комбинированной системы управления служит для грубого регулирования состава дистиллята X_d путём изменения параметра α.

Работа предлагаемой системы управления должна быть обеспечена определёнными программными средствами, используемыми участниками бизнес-процесса при решении задач управления технологическим процессом. Логические связи между этими программными средствами и участниками бизнес-процесса представляются на диаграмме прецедентов использования автоматизированных систем управления (здесь не приводится). Так, оператор-технолог в своей работе использует программы технологической станции обработки сигналов измерительных преобразователей и определения значений технологических параметров, архивируемых на станции оператора, а также программные средства преобразования и передачи на регулирующие клапаны управляющих воздействий, вырабатываемых локальными регуляторами системы управления. Кроме того, он использует также программные средства обнаружения нарушений технологического регламента контроли-

руемого им процесса и визуализации различной технологической информации в форме трендов технологических параметров и фрагментов технологических схем процесса. Сообщения системы противоаварийной защиты процесса, а также системы сбора информации поступают оператору-технологу, а затем передаются другим участникам бизнес-процесса.

Для функционирования комбинированной системы автоматического управления также требуются средства, которые можно интерпретировать как программные средства оператора-технолога, поскольку именно он несёт ответственность за эффективное протекание технологического процесса. К таким средствам относятся программы компенсации внешних и внутренних возмущающих воздействий, регулирования технологических параметров отклонения общего программного обеспечения, а также программа реализации работы нечёткого регулятора отклонения комбинированной системы управления.

К программным средствам главного технолога цеха относятся программы управленческого учёта производства, определяющие фактические значения удельных затрат производственных ресурсов и других производственных показателей работы цеха; программа, обслуживающая журнал нарушений технологического регламента, и программа, обслуживающая журнал реализованных решений оператора-технолога.

Начальник цеховой АСУТП в своей работе, связанной с информационными технологиями, использует программы контроля состояния технических средств системы управления и контроля исполнения заказов новых программных средств. На диаграмме прецедентов использования системы управления отражается первый этап разработки её программного обеспечения. Второй этап разработки программного обеспечения системы управления отражается на диаграмме компонентов (рис. 6).

На этой диаграмме каждому программному средству соответствует определённая задача, которая при решении должна выдавать требуемую информацию в виде файлов и иметь конкретное наименование. Все выдаваемые компонентом файлы обозначаются на диаграмме выходным интерфейсом в виде вилки. После указания выдаваемой компонентом информации может быть решён вопрос о том, какая информация должна быть введена в данный компонент пользователем, из справочников базы данных системы или от других компонентов программного обеспечения для получения выходной информации в полном объёме. Исходная информация для работы компонента поступает в него через входные интерфейсы, изображённые на диаграмме компонентов в виде розетки.

В состав компонентов программного обеспечения системы управления процессом ректификационного разделения смеси этаноламинов входят компоненты специального программного обеспечения: моделирующий алгоритм работы кипятильника колонны; моделирующий алгоритм компенсации внешних возмущающих воздействий, определяющий требуемый расход дистиллята; моделирующий алгоритм, определяющий расход флегмы. К компонентам специального программного обеспечения можно также отнести алгоритм оптимального выбора флегмового числа, моделирующий алгоритм определения состава выходных потоков насадочной ректификационной колонны и алгоритм нечёткого регулирования показателей процесса по отклонению.

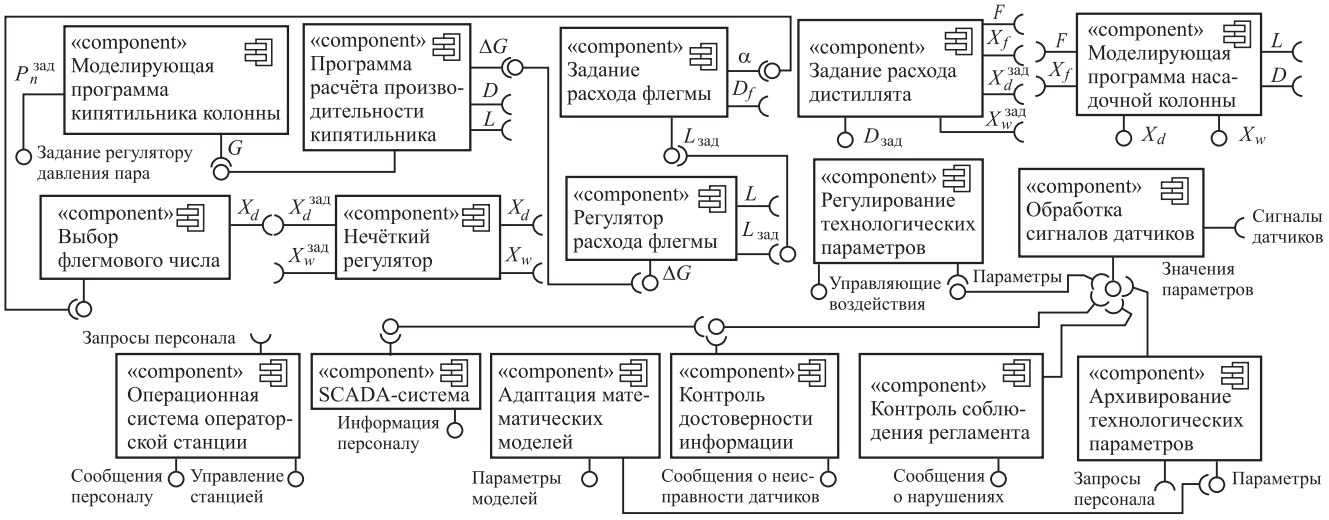


Рис. 6. Диаграмма компонентов программного обеспечения систем управления

Из коммерческого программного обеспечения для работы рассматриваемой системы управления используются такие компоненты, как операционные системы операторской станции, технологической станции и станции противоаварийной защиты. Кроме операционных систем в состав коммерческого программного обеспечения входят компоненты, размещённые на технологической станции: программа обработки сигналов измерительных преобразователей для определения значений технологических параметров, программа регулирования технологических параметров по отклонению с выдачей аналоговых сигналов на регулирующие клапаны и программа противоаварийной защиты технологического процесса.

Коммерческими компонентами, размещёнными на операторской станции, являются программные средства визуализации технологической информации и архивирования значений технологических параметров, а также поддержания базы данных нормативно-справочной информации. Кроме того, к этому виду компонентов относятся программы контроля достоверности значений технологических параметров, контроля соблюдения технологического регламента, адаптации математических моделей и управленческого учёта.

Третьим этапом разработки программного обеспечения системы управления является разработка диаграмм деятельности (блок-схем программ) для всех компонентов специального программного обеспечения с использованием диаграмм деятельности для кодирования этих компонентов на один из объектно-ориентированных языков программирования.

Аппаратное обеспечение разрабатываемой системы управления с размещёнными на его элементах (узлах) программными средствами и другими артефактами представляют диаграмму развёртывания системы управления, являющуюся физической моделью этой системы (рис. 7).

Рассматриваемое здесь аппаратное обеспечение системы управления включает операторскую станцию, рабочую станцию главного технолога цеха, технологическую станцию объекта управления и технологическую станцию противоаварийной защиты технологического процесса. Узлы аппаратного обеспечения системы управления образуют локальную сеть топологии «Звезда», в центре которой помещается операторская станция. На диаграмме развёртывания системы управления с каждым узлом соединены артефакты, размещённые на нём с указанием их наименования. На диаграмме развёртывания показана также связь технологической станции с элементами полевого уровня: измерительными преобразователями и регулирующими клапанами, представленными на диаграмме в виде узлов. Представленные на диаграмме развёртывания элементы аппаратного обеспе-

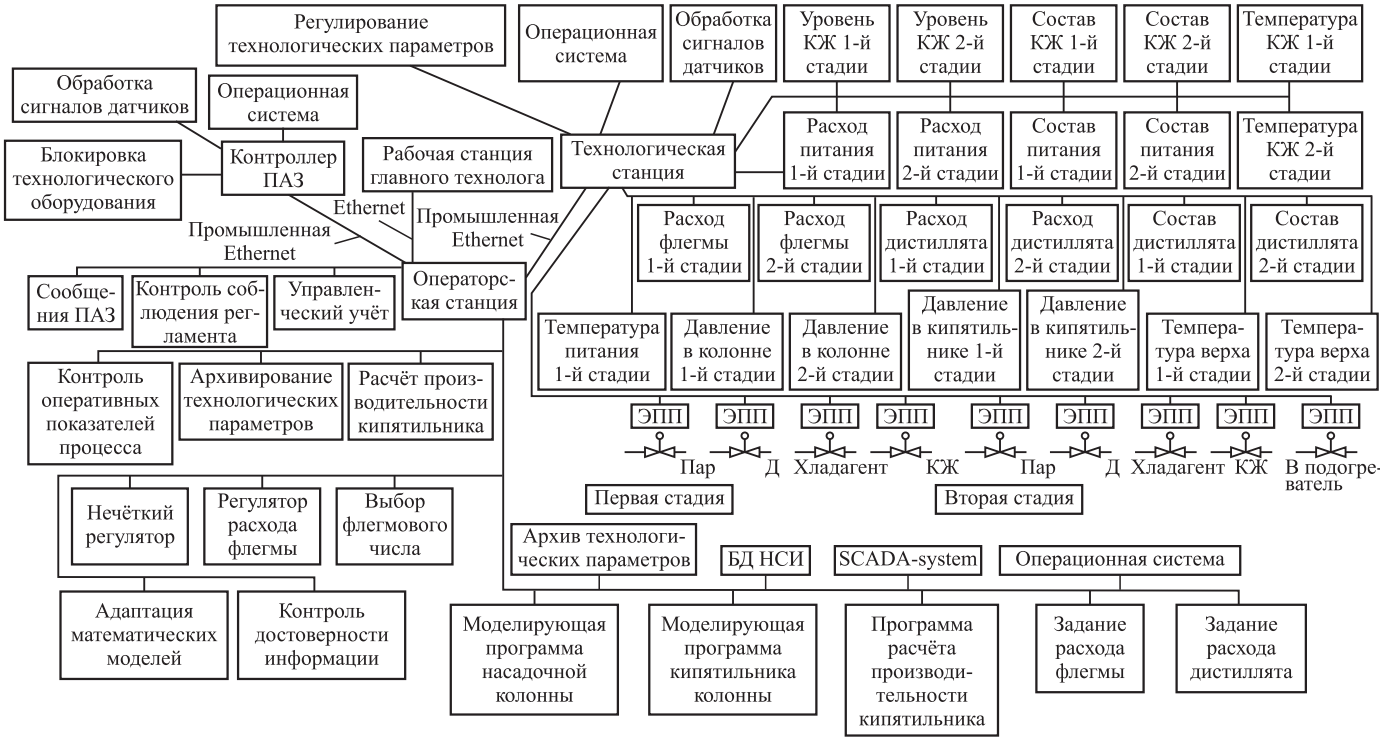


Рис. 7. Диаграмма развёртывания системы управления процессом разделения этаноламинов

чения системы управления используются для выбора технических средств управления рассматриваемым технологическим процессом. Эти технические средства представляются на диаграмме технического обеспечения системы управления процессом разделения смеси этаноламинов, которая здесь не приводится.

Таким образом, представленный системный подход к разработке системы управления технологическим процессом проиллюстрирован на конкретном примере разработки системы управления процессом разделения смеси этаноламинов. Этот подход включает следующие основные этапы: описание предметной области на базе диаграммы бизнес-процесса, обоснование актуальных задач управления технологическим процессом с разработкой технологических схем процессов и функциональных схем управления. Перечень этапов системной разработки следует дополнить разработкой следующих диаграмм: прецедентов использования автоматизированной системы управления, компонентов программного обеспечения, деятельности (блок-схем программ) для всех компонентов специального программного обеспечения, диаграмм развёртывания и технического обеспечения.

Библиографические ссылки

1. **Буч Г., Рамбо Д., Якобсон А.** Язык *UML*. Руководство пользователя. М.: ДМК, 2007. 496 с.

2. **Буч Г.** Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений. М.: Вильямс, 2008. 720 с.

3. **Мацяшек Л.А.** Анализ и проектирование информационных систем с помощью *UML* 2.0. М.: Вильямс, 2008. 816 с.

4. **Мончарж Э.М., Песков Н.П., Токарев С.В.** Комбинированная система управления процессом ректификации смеси ди- и триэтаноламина // Вестник ВГУ. Системный анализ и информационные технологии. 2016. № 4. С. 49—55.

5. **Гостев В.И.** Проектирование нечётких регуляторов для систем автоматического управления. СПб.: БХВ, 2011. 416 с.

Ссылка для цитирования

Мончарж Э.М., Песков Н.П. Системная автоматизация процесса ректификационного разделения смеси этаноламинов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 12. С. 536—542.

УДК 62-52

И.Н. Куликов, Л.Л. Колесник, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

kulik19998@gmail.com, l.kolesnik@m-i.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОНОВКИ МОДУЛЕЙ МНОГОКЛАСТЕРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НА ОБЩУЮ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследованы многокластерный технологический комплекс (МТК), зависимость его производительности от вариантов компоновки и график запуска полуфабрикатов с помощью имитационного моделирования. Показано, что с помощью данного подхода можно существенно упростить оптимальное решение задачи построения такого комплекса при наличии потоков пластин двух типов, а также нахождение графика запуска для максимальной и минимальной производительности.

Ключевые слова: полупроводниковое производство; многокластерный технологический комплекс; структурные схемы полуфабрикатов; график запуска полуфабрикатов.

The multicluster technological complex (MTC), its productivity dependence on layout variants and the schedule of launching of semi-finished products by means of simulation modeling are investigated. It is shown that with the help of this approach it is possible to substantially simplify the problem optimal solution of such complex construction at the presence of two types of plate fluxes, as well as finding the start-up schedule for maximum and minimum performance.

Keywords: semiconductor production; multicluster technological complex; structural diagrams of semi-finished products; a schedule for starting semi-finished products.

Введение. Основными причинами перехода промышленности на использование кластерного оборудования является его высокая производительность и возможность производства в едином вакуумном цикле.

Многокластерные технологические комплексы (МТК) применяются в полупроводниковом производстве для соблюдения условий вакуумной гигиены при производстве электронных устройств. В едином вакуумном цикле могут проводиться различные операции — нагрев, напыление плёнок, контроль качества и др. При наличии в системе пластин одного типа они направляются по заданному рецепту (маршруту) по принципу «друг за другом». Для увеличения коэффициента утилизации установки и при наличии соответствующих модулей целесообразно в систему одновременно запускать пластины с разными маршрутами. В таких случаях необходимо находить оптимальные варианты структурных компоновок и соответствующих им графиков запуска полуфабрикатов.

При этом для рационального проектирования необходимо обоснованно выбирать структурно-компоновочные варианты кластерного комплекса [1], а на этапе его эксплуатации оперативно управлять потоками полуфабрикатов в целях большей загрузки и увеличения производительности комплекса в целом [2, 3].

Решение проблемы. Чтобы найти наиболее оптимальные варианты графика запуска полуфабрикатов и компоновки комплекса, ввиду нетривиальности задачи предлагается использовать имитационное моделирование [4].

Для построения имитационной модели анализа процессов управления потоками полуфабрикатов была выбрана среда моделирования AnyLogic, которая обладает рядом преимуществ и поддерживает различные подходы к моделированию, в том числе и агентный [5].

В разработанной имитационной модели с помощью класса активных объектов реализованы входной буфер, выходной буфер и кластер. Кроме того, в модели созданы простые классы: модуль, пластина, транспорт, робот и операция.

В работе проведены четыре различных варианта моделирования.

Общие параметры для всех вариантов моделирования остаются постоянными величинами:

модули, выполняющие операции с пластинами обоих типов — 1, 3, 5, 7, 8, 10;

количество пластин 1-го типа — 8;

количество пластин 2-го типа — 7;

количество операций для пластин 1-го типа — 10;

количество операций для пластин 2-го типа — 6;

количество лап у роботов-манипуляторов — 2;

скорость робота-манипулятора — 0,35π рад/с (табл. 1).

Таблица 1

Исходные данные для моделирования

Номер операции	Тип пластины	Модуль	Длительность, с
1	1	1	30
2	1	2	49
3	1	3	17
4	1	4	30
5	1	5	60
6	1	6	25
7	1	7	32
8	1	8	15
9	1	9	82
10	1	10	61
11	2	1	30
12	2	3	41
13	2	5	48
14	2	7	20
15	2	8	42
16	2	10	61

Рассмотрим каждый вариант моделирования в отдельности.

Моделирование 1. Исходные параметры:

рецепт пластин 1-го типа (номера модулей): *1 — 2 — 3 — 4 — 5 — 6 — 7 — 8 — 9 — 10*;

рецепт пластин 2-го типа (номера модулей): *1 — 3 — 5 — 7 — 8 — 10* (рис. 1).

По результатам имитационного моделирования наименьшее время обработки по заданному маршруту составило 1311,94 с, максимальное — 1508,14 с. Графики запуска показаны на рис. 2.

Моделирование 2. Исходные параметры:

рецепт пластин 1-го типа (номера модулей): *1* — 2 — 3 — 4 — 5 — 6 — 7* — 8 — 9 — 10*;

рецепт пластин 2-го типа (номера модулей): *1* — 3 — 5 — 7* — 8 — 10*;

модули *1* и *7* поменялись местами (рис. 3).

По результатам имитационного моделирования наименьшее время обработки по за-

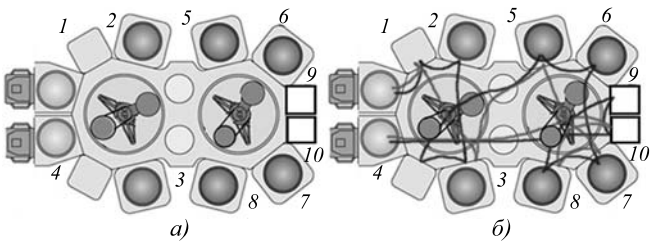


Рис. 1. Расположение модулей в установке (*а*), графическое изображение рецептов и движение пластин (*б*) (моделирование 1)

Максимальная производительность
2
1
2
1
1
1
2
1
2
2
2
2
1
1
1

а)

Минимальная производительность		
2	2	2
2	2	2
2	2	2
1	2	2
2	1	2
2	2	1
1	1	1
1	1	1
1	1	1
1	1	1
1	1	1
2	2	2
2	2	2
1	1	1
1	1	1

б)

Рис. 2. Графики запуска полуфабрикатов с максимальной (*а*) и минимальной (*б*) производительностью (моделирование 1):

— пластины 1-го типа; — пластины 2-го типа

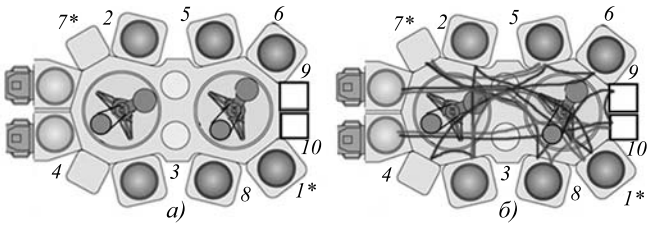


Рис. 3. Расположение модулей в установке (*а*), графическое изображение рецептов и движение пластин (*б*) (моделирование 2)

Максимальная производительность
2
2
1
1
1
1
1
1
2
2
1
2
2
1
2

а)

Минимальная производительность
1
1
2
2
2
2
1
1
2
1
2
2
1
1
1

б)

Рис. 4. Графики запуска полуфабрикатов с максимальной (*а*) и минимальной (*б*) производительностью (моделирование 2)

данному маршруту составило 1396,07 с, максимальное — 1878,46 с. Графики запуска показаны на рис. 4.

Моделирование 3. Исходные параметры:

рецепт пластин 1-го типа (номера модулей): *1 — 2 — 3** — 4 — 5 — 6** — 7 — 8 — 9 — 10*;

рецепт пластин 2-го типа (номера модулей): *1 — 3** — 5 — 7 — 8 — 10*;

модули *3* и *6* поменялись местами (рис. 5).

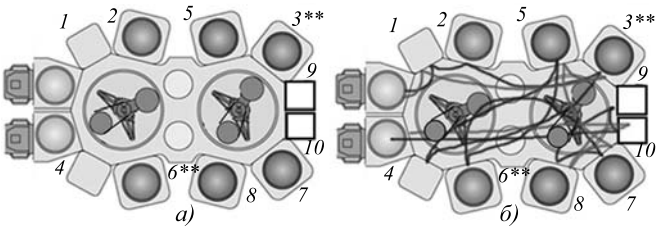


Рис. 5. Расположение модулей в установке (*а*), графическое изображение рецептов и движение пластин (*б*) (моделирование 3)

Максимальная производительность
2
1
1
2
1
2
1
2
2
2
1
1
2
1
1

а)

Минимальная производительность
1
2
2
2
2
1
1
1
1
1
2
1
2
1
2

б)

Рис. 6. Графики запуска полуфабрикатов с максимальной (*а*) и минимальной (*б*) производительностью (моделирование 3)

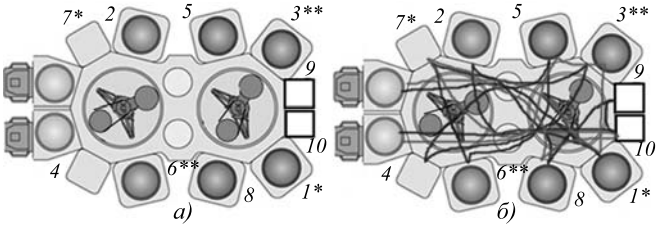


Рис. 7. Расположение модулей в установке (*а*), графическое изображение рецептов и движение пластин (*б*) (моделирование 4)

По результатам имитационного моделирования наименьшее время обработки по заданному маршруту составило 1343,56 с, максимальное — 1656,40 с. Графики запуска показаны на рис. 6.

Моделирование 4. Исходные параметры:

рецепт пластин 1-го типа (номера модулей): *1* — 2 — 3** — 4 — 5 — 6** — 7* — 8 — 9 — 10*;

рецепт пластин 2-го типа (номера модулей): *1* — 3** — 5 — 7* — 8 — 10*;

модули *1* и *7*, *3* и *6* поменялись местами (рис. 7).

По результатам имитационного моделирования наименьшее время обработки по заданному маршруту составило 1391,12 с, максимальное — 1850,89 с. Графики запуска показаны на рис. 8.

Таблица 2

Сводная таблица по всем вариантам моделирования

Моделирование	Рецепт пластин 1-го типа	Рецепт пластин 2-го типа	Минимальное время на обработку лота, с	Максимальное время на обработку лота, с
1	*1 — 2 — 3 — 4 — 5 — 6 — 7 — 8 — 9 — 10*	*1 — 3 — 5 — 7 — 8 — 10*	1311,94	1508,14
2	*1* — 2 — 3 — 4 — 5 — 6 — 7* — 8 — 9 — 10*	*1* — 3 — 5 — 7* — 8 — 10*	1396,07	1878,46
3	*1 — 2 — 3** — 4 — 5 — 6** — 7 — 8 — 9 — 10*	*1 — 3** — 5 — 7 — 8 — 10*	1343,56	1656,40
4	*1* — 2 — 3** — 4 — 5 — 6** — 7* — 8 — 9 — 10*	*1* — 3** — 5 — 7* — 8 — 10*	1391,12	1850,89

Рис. 8. Графики запуска полуфабрикатов с максимальной (*а*) и минимальной (*б*) производительностью (моделирование 4)

Данные по всем вариантам моделирования сведены в табл. 2.

Очевидно, что перестановка модулей существенно влияет на общую производительность. В данном случае (среди проведённых моделирований) наиболее оптимальной компоновкой является исходная. Следует отметить, что в статье не ставилась цель решить задачу нахождения оптимальной компоновки для максимальной производительности установки. Цель работы — показать, что при заданных условиях целесообразно проводить имитационное моделирование, что существует значительная разница между различными вариантами компоновок. Нахождение наиболее оптимальной компоновки для указанных рецептов выходит за рамки данного исследования ввиду его высокой трудоёмкости. Однако для целей проектирования новых установок или модификации уже существующих целесообразно пользоваться имитационным моделированием для расчёта наиболее оптимального варианта при заданных условиях.

Заключение. С помощью имитационного моделирования были реализованы различные сценарии компоновки многокластерной установки с двумя потоками полуфабрикатов в системе. Таким образом, при проектировании новой установки или при эксплуатации уже существующей целесообразно использовать имитационное моделирование для поиска наиболее оптимальной компоновки и графика запуска полуфабрикатов.

Библиографические ссылки

1. **Куликов И.Н.** Автоматизированное формирование структур мультикластерных технологических комплексов // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 2. С. 63—73.

2. **Paek J.-H., Lee T.-E.** Optimal Scheduling of Dual-armed Cluster Tools Without Swap Restiction // Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. 2008. P. 103—108.

3. **Scholl W., Gan B.P., Peh M.L., Lendermann P., Noack D., Rose O., Preuss P.** Towards Realization of a High-Fidelity Simulation Model for Short-Term Horizon Forecasting in Wafer Fabrication Facilities // Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. IEEE Service Center. 2010. P. 2563—2574.

4. **Куликов И.Н., Рябов В.Т., Шубников А.В.** Имитационное моделирование кластерного технологического оборудования в полупроводниковом производстве // Наноинженерия. 2013. № 9 (27). С. 3—6.

5. **Куликов И.Н.** Имитационное моделирование управления потоками полуфабрикатов в многокластерном технологическом комплексе // Образование. Наука. Научные кадры. 2015. № 5. С. 271—275.

Ссылка для цитирования

Куликов И.Н., Колесник Л.Л. Исследование влияния компоновки модулей многокластерного технологического комплекса на общую производительность установки с использованием имитационного моделирования // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 12. С. 542—545.

УДК 681.5.09

Б.М. Бржозовский, д-р техн. наук, проф., **В.В. Мартынов,** д-р техн. наук, проф., **А.В. Сусский**
(Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.)

v_martynov@mail.ru

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ

Представлены результаты исследований по выбору и обоснованию информационно-измерительного канала для мониторинга процесса низкотемпературного плазменного упрочнения поверхностного слоя изделий из металлических материалов и сплавов.

Ключевые слова: металлическое изделие; поверхностный слой; низкотемпературное плазменное упрочнение; мониторинг; электрический сигнал.

The research results on the selection and justification of the information-measuring channel for monitoring the process of low-temperature plasma hardening of the articles surface layer made from metallic materials and alloys are presented.

Keywords: metal product; surface layer; low-temperature plasma hardening; monitoring; electric signal.

Развитие производства в различных отраслях промышленности характеризуется ужесточением условий эксплуатации деталей и изделий из металлических материалов и сплавов. Это требует непрерывного совершенствования существующих и развития новых технологий изготовления деталей и изделий. К числу таких технологий относится упрочнение воздействием на изделие низкотемпературной плазмой комбинированного разряда пониженного давления. Технология позволяет упрочнять поверхностный слой изделий за счёт формирования в нём нанокомпозитной структуры [1].

Процесс упрочнения реализуется в специальной установке, которая содержит набор функциональных блоков, объединённых рамным каркасом и обеспечивающих формирование облака плазмы непосредственно вокруг обрабатываемой поверхности наложением электростатического и электромагнитного полей при определенном давлении в среде смеси технологических газов.

Результаты теоретических исследований воздействия плазмы на поверхность обрабатываемого изделия [2] показали целесообразность организации наблюдения за ходом процесса воздействия. Для этого были выполнены экспериментальные исследования на образцах и изделиях из различных материалов (коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т, инструментальной стали Р6М5, вольфрамокобальтового твердого сплава RX-10). В процессе исследований регистрировались параметры, отображающие основные физические явления, сопровождающие взаимодействие плазмы с поверхностью:

с помощью контактно-термопарного узла регистрировалась температура в теле держателя образца (изделия) и с частотой 1 Гц и точностью 0,1 °С регистрируемый сигнал передавался через АЦП ADAM-4018 в компьютер;

с помощью миниатюрной видеокамеры WNK-102 регистрировалось изображение плазменного облака и с частотой 25 Гц передавалось в компьютер;

с сопротивления 10 000 Ом, включенного между управляемым источником питания и образцом (изделием), с помощью цифрового запоминающего осциллографа DSO1022A и компьютера регистрировался с частотой 213,33 Гц ток в цепи плазма — образец — держатель — земля.

Кроме этого, проводилось измерение микротвёрдости образцов и изделий (по Виккерсу) динамическим методом с помощью микротвердомера ПМТ-3 до и после воздействия плазмы и вычислялось суммарное приращение плотности их поверхностного слоя [3].

Далее представлены результаты обработки данных, полученных в ходе исследований, и выполнен их сравнительный анализ.

Обработка температурного сигнала. Обработку проводили по данным, зарегистрированным при упрочнении двух изделий — свёрл из стали Р6М5 диаметром 6 мм — при одинаковых значениях параметров технологи-

ческого режима (потенциала смещения, уровня подводимой СВЧ-мощности и времени обработки) и различной площади обработки. В ходе обработки вычисляли скорости и фиксировали максимальные температуры нагрева поверхностного слоя свёрл. Сравнение этих параметров с вычисленным суммарным приращением плотности поверхностного слоя $\Delta\rho_\Sigma$ показало наличие обратно пропорциональной зависимости (рис. 1). Это связано с тем, что чем меньшее значение имеет скорость нагрева, тем быстрее из зоны нагрева будет отводиться избыточное тепло и тем меньше будет вероятность перегрева поверхности [4].

Обработка изображений плазменного облака. Изображения плазменного облака помещали в стандартное программное обеспечение Corel Draw X6 и измеряли их максимальный и минимальный диаметры. По полученным массивам:

вычисляли амплитуды пульсаций плазменного облака за время упрочнения как модули разности между предыдущим и последующим значениями его диаметра;

вычисляли накопленные (за 1 с) пульсации суммированием их значений, соответствующих частоте видеозаписи (25 Гц);

проводили статистическую обработку массивов накопленных пульсаций и диаметров плазменного облака: определяли законы их распределений и вычисляли накопленный размах $R_{пл}$ — разность между квантилями 0,95 и 0,05 распределений накопленных пульсаций — и моду диаметра $M_д$ — его наиболее вероятное значение.

Сравнение полученных данных с показателями температуры показало (рис. 2), что чем интенсивнее пульсирует плазменное облако и чем меньше наиболее вероятное значение его диаметра, тем менее интенсивно протекает процесс нагрева.

Обработка электрических сигналов. Анализ зафиксированных осциллограмм токовых сигналов показал, что процесс упрочнения свёрл протекал в различных условиях и, как следствие, имел различные состояния, которые характеризуются в различной степени как значениями амплитуд, так и формой сигналов [5].

Обработку полученных данных осуществляли с помощью дискретного преобразования Фурье, которое позволяет получить спектр колебаний токового сигнала в ходе процесса упрочнения (рис. 3), являющийся отображением физических процессов, протекающих в электрической цепи плазма — изделие — держатель — земля.

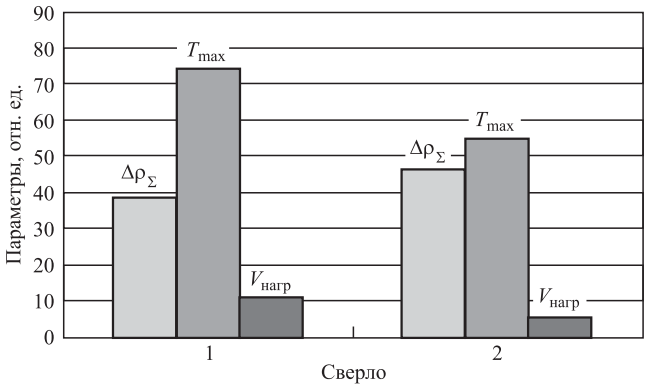


Рис. 1. Взаимосвязь суммарного приращения плотности по глубине поверхностного слоя $\Delta\rho_\Sigma$ с параметрами процесса нагрева:
T_{max} — максимальная температура; $V_{нагр}$ — скорость нагрева

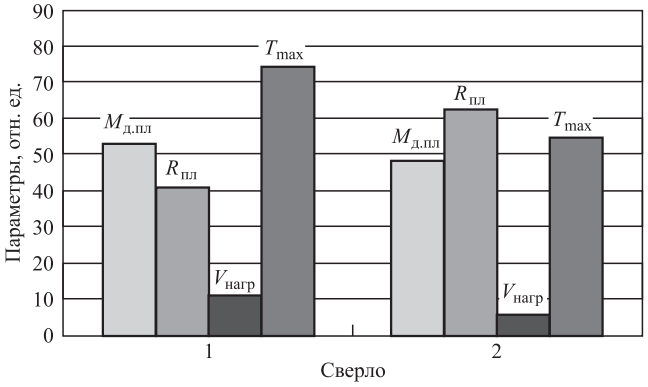


Рис. 2. Взаимосвязь геометрических параметров взаимодействия электромагнитного и электростатического полей с параметрами процесса нагрева:
$M_{д.пл}$ — мода диаметра плазмы; $R_{пл}$ — размах накопленных пульсаций плазмы; $V_{нагр}$ — скорость нагрева; T_{max} — максимальная температура

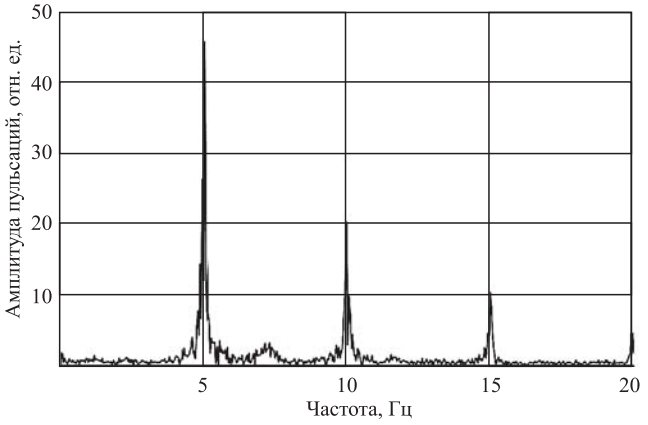


Рис. 3. Спектр колебаний сигнала тока смещения в процессе низкотемпературного плазменного упрочнения

Для сравнения электрических сигналов с оптическими сигналами были вычислены спектры колебаний оптических сигналов (рис. 4). Анализ результатов сравнения пока-

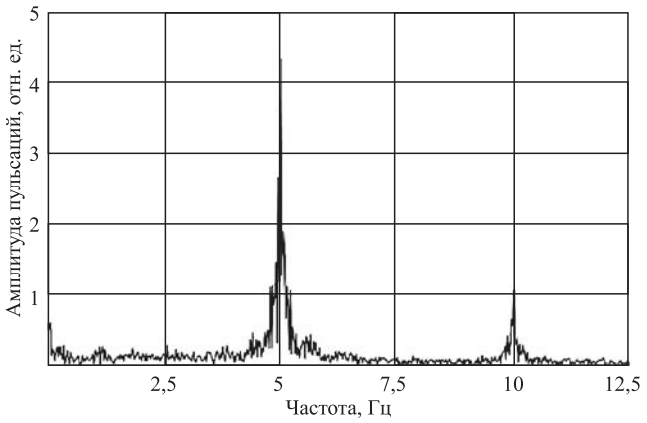


Рис. 4. Спектр колебаний видеосигнала плазменного облака в процессе низкотемпературного плазменного упрочнения

зал, что и электрический (см. рис. 3), и оптический (см. рис. 4) сигналы в одинаковой степени отражают процессы, протекающие при плазменном упрочнении.

В целом результаты выполненных исследований позволяют констатировать, что наблюдать за ходом процесса низкотемпературного плазменного упрочнения можно с использованием любого из рассмотренных сигналов: температурного, оптического и электрического. Однако наибольшая результативность обеспечивается при использовании электрического сигнала, поскольку электрические процессы являются быстропротекающими и позволяют, во-первых, наблюдать за процессом в режиме реального времени, во-вторых, получать данные в объёме, позволяющем оперативно оценивать не только состояние процесса, но и его изменения, т. е., по сути, вести мониторинг. Кроме того, сигналы о температуре реагируют на изменения в ходе процесса упрочнения с запаздыванием, что связано с особенностями их прохождения и регистрации в системе плазма — изделие — держатель, а оптический сигнал сложно обрабатывать в автоматическом режиме.

Для организации мониторинга процесса низкотемпературного плазменного упрочнения по параметрам электрических сигналов необходимо решить вопросы выбора измерительного элемента (датчика) и средств передачи сигналов в компьютер для их обработки: аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и соединительного кабеля.

Измерительный элемент. Для измерения электрических сигналов обычно применяют резисторы различных типов и номиналов [6], в частности резисторы постоянного сопротивления, которые разделяются на проволочные и непроволочные [7]. Первые отличаются высокой стабильностью, работают при высоких температурах и выдерживают значительные перегрузки. Однако они малопригодны на частотах выше 1...2 МГц, так как обладают высокими собственной ёмкостью и индуктивностью, которые проявляются уже на частотах в несколько килогерц. Вторые отличаются возможностью применения на высоких частотах (до 10 ГГц), но их основной недостаток — зависимость от окружающей среды (температуры, влажности). Необходимо учитывать и номинал сопротивления резисторов. Поэтому для выбора резистора были выполнены предварительные экспериментальные исследования, в ходе которых регистрировали электрические сигналы с резисторов различных номиналов. Результаты исследований показали, что с учётом физических особенностей процесса низкотемпературного плазменного упрочнения [2] оптимальным является непроволочный резистор типа МЛТ (металлизированный, лакированный эмалью, теплостойкий) с номинальным сопротивлением 10 кОм.

Аналого-цифровой преобразователь. При выборе АЦП учитывали такие параметры, как разрядность его выходных данных, время получения на его выходе следующего отсчёта цифрового сигнала, а также скорость преобразования, с учетом того, что минимальная частота поступления выходного сигнала должна быть не менее 1 МГц. Совокупность этих параметров определила выбор параллельного АЦП [8].

Соединительный кабель. Существует три основных вида соединительных кабелей для передачи данных: коаксиальный кабель, оптическое волокно и витая пара [9].

С точки зрения помехозащищенности решающее преимущество имеют оптоволоконные кабели. Однако стоимость оптического волокна в несколько раз превышает стоимость кабелей других видов, поэтому его применение нецелесообразно.

В кабелях с витыми парами при несбалансированных низкоимпедансных нагрузках чувствительность к наводкам существенно зависит от параметров свивки (шага навивки, заделки концов) проводов. При высоких импедансах нагрузки эта зависимость существенно меньше. Такой эффект объясняется тем, что при низкоимпедансных нагрузках индуктивная составляющая доминирует над емкостной, а в случае высокоимпедансных — наоборот.

Тонкий коаксиальный кабель более помехоустойчив, поскольку затухание сигнала в нём меньше, чем в витой паре. Он безопасен, прост

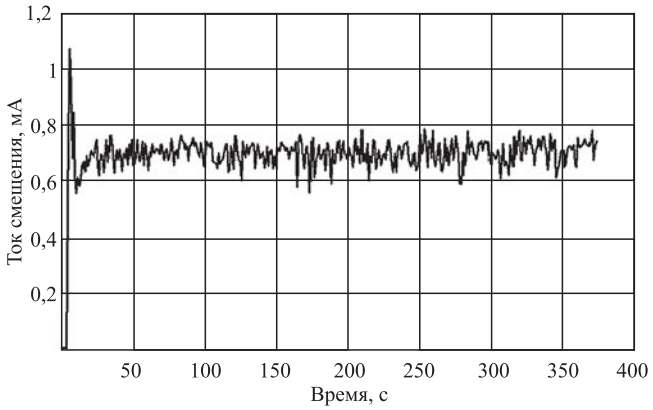


Рис. 5. Пример результатов графического отображения электрического сигнала в ходе процесса низкотемпературного плазменного упрочнения

в установке, обладает значительной гибкостью, способен передавать электрический сигнал на расстояние до 185 м без его заметного искажения, вызванного затуханием (в данном случае дальность передачи сигнала составляет менее 1 м), и относительно недорог.

В связи с изложенным в качестве соединительного кабеля был выбран тонкий коаксиальный кабель.

Для передачи данных разработано специальное программное обеспечение, позволяющее отображать их на экране в цифровом и графическом виде (рис. 5) и записывать в файл.

Результаты выполненных исследований позволили сформулировать основные требования к информационно-измерительному каналу мониторинга процесса низкотемпературного плазменного упрочнения по параметрам электрических сигналов. Главным требованием является обеспечение возможности получения всей необходимой информации в масштабе реального времени на основе регистрации и обработки больших объёмов данных, представленных временны́ми рядами динамики.

К числу основных технических параметров канала относятся:

Длительность регистрации сигнала, с	1,0...1,5
Периодичность регистрации сигнала, с	1,0...2,0
Длина трассы передачи сигнала, м	0,25...0,75
Частотный диапазон анализа сигнала, Гц	1...10 000
Время поступления выходной информации, с	Не более 1,0
Температурный диапазон работы, °С	−30...+50
Напряжение питания, В	220
Срок службы, годы	3...5

В заключение необходимо отметить, что интеграция разработанного информационно-измерительного канала в структуру системы управления установкой низкотемпературного плазменного упрочнения позволит эффективно решать вопросы поддержания минимального значения скорости нагрева изделия в условиях объективно существующих изменений параметров как самой плазмы, так и поверхностного слоя изделия при их взаимодействии, т. е. управлять процессом упрочнения.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-00030).

Библиографические ссылки

1. **Composite** ion-plasma coatings with nanodisperse reinforced phase: scientific and practical aspects of synthesis / B. Brzhozovskii, V. Martynov, E. Zinina and M. Brovkova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 116. DOI:10.1088/1757-899X/116/1/012007.

2. **Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В.** Физика упрочнения поверхностного слоя геометрически сложных изделий воздействием низкотемпературной плазмы // Пленки и покрытия — 2017: сб. тр. 13-й Междунар. конф. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2017. С. 63—66.

3. **Интегральное** оценивание качества процесса плазменной модификации рабочей части металлорежущего инструмента / Б.М. Бржозовский, С.Б. Вениг, В.В. Галушка и др. Саратов: Изд. дом «Райт-Экспо», 2014. 160 с.

4. **Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Зинина Е.П.** Экспериментальное исследование тепловых процессов при упрочнении металлорежущего инструмента в низкотемпературной плазме // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2015. № 2. С. 38—43.

5. **Fluctuations** in the process plant as a quality assessment criterion of low-temperature plasma hardening process / V. Martynov, B. Brzhozovsky, E. Zinina et al. // Procedia Engineering. 2017. Vol. 176. P. 451—460.

6. **Резисторы:** справочник / Ю.Н. Андреев, А.И. Антонян, Д.М. Иванов и др.; под ред. И.И. Четверткова. М.: Энергоиздат, 1981. 352 с.

7. **Проволочные** резисторы / М.Т. Железнов, Д.М. Иванов, Н.С. Тамбовцев и др. М.: Энергия, 1970. 240 с.

8. **Федорков Б.Г., Телец В.А.** Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.

9. **Анненков Ю.М., Ивашутенко А.С.** Перспективные материалы и технологии в электроизоляционной и кабельной технике: учеб. пособие. Томск, ТПУ, 2011. 212 с.

Ссылка для цитирования

Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Сусский А.В. Разработка информационно-измерительного канала мониторинга процесса низкотемпературного плазменного упрочнения // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 12. С. 546—549.

УДК 621.833.6

Р.В. Пустозеров, Р.А. Юрьева, И.В. Анисимов, И.А. Тулькова
(Университет информационных технологий, механики и оптики, г. Санкт-Петербург)

e-mail: pustozerov@diakont.com

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСЕВОЙ ЖЁСТКОСТИ ДЕТАЛЕЙ РОЛИКОВЫХ ВИНТОВЫХ ПЕРЕДАЧ

Предложен универсальный численный метод определения осевой жёсткости деталей роликовых винтовых передач. Рассмотрены особенности роликовых винтовых передач, оказывающие влияние на положение точек первоначального контакта сопрягаемых резьбовых поверхностей основных деталей передачи. Приведены примеры расчётов координат точек контакта для различных типов роликовых винтовых передач, проведённых при помощи программного комплекса, разработанного на основе описанного метода.

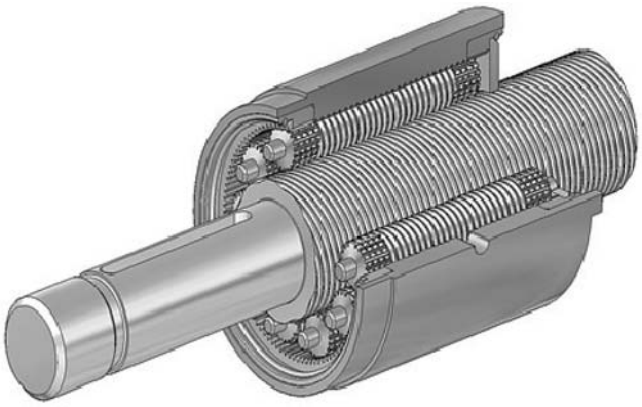
Ключевые слова: планетарная роликовая винтовая передача; численный алгоритм; координаты точек контакта; системы автоматизированного проектирования.

A universal numerical method for determining the axial rigidity of parts for roller helical transmission is proposed. Features of roller helical transmission affecting the position points of the mating helical surfaces initial contact for the main transmission parts are considered. The calculation examples of the contact points coordinates for various types of roller helical transmission, carried out by using a software package developed on the basis of the described method, are given.

Keywords: planetary roller helical transmission; numerical algorithm; coordinates of contact points; computer-aided design systems (CAD).

Введение. Роликовые винтовые передачи (РВП) обладают рядом преимуществ, но их достижение возможно только при комплексном проектировании конструкции и технологии изготовления всех деталей передачи. При проектировании важно корректно учитывать особенности кинематики передачи и характер внутреннего силового взаимодействия [1].

Одним из параметров РВП, характеризующих их качественные свойства, является осевая жёсткость. Метод оценки этого параметра рассматривается в предлагаемой статье.



3D-модель РВП

Метод моделирования нагружения РВП. Суть метода заключается в математическом моделировании нагружения РВП внешней осевой силой и определении осевого смещения винта относительно гайки [2]. Модель РВП приведена на рисунке.

Для моделирования РВП построим систему координат таким образом, чтобы ось X являлась осью вращения винта и гайки, а ось Y была перпендикулярна к оси X и проходила через оси вращения винта и ролика.

Для полного описания положения тел определим степени свободы: винт — перемещение по оси X, ролики — по осям X, Y. Введём обозначения:

$F_X = \Sigma F_{Xvi}$ — осевая нагрузка на винт, равная сумме нагрузок F_{Xvi} , действующих между витками резьбы винта и роликов; i — число витков;

$F_Y = \Sigma F_{Yvi} + \Sigma F_{Ygi}$ — радиальная нагрузка, действующая на ролик; F_{Yvi} — радиальная нагрузка от винта; F_{Ygi} — радиальная нагрузка от гайки [3].

Рассчитаем нормальную силу в контакте:

$$F_T = \frac{F_X}{\cos\gamma \cos\alpha},$$

где γ — угол подъёма резьбы; α — половина угла профиля резьбы [4—8].

Подготовка к расчёту и последовательность расчёта осевой жёсткости:

1. Винт и ролики выставляются в нулевое положение, гайка жёстко закрепляется.

2. Винт перемещается на малое расстояние по оси *X*.

3. Для каждого ролика определяются все зазоры по оси *X* между резьбой ролика с винтом и гайкой, для каждого витка резьбы справа и слева:

зазор между резьбой ролика с винтом для витка резьбы справа:

$$dx_{rv}^{R} = -dx_v + dx_{r(i)} + dy_{r(i)}\mathrm{tg}\alpha_v - dt_{v(i,j)} - \\ - 0,5dd_{v(i,j)}\mathrm{tg}\alpha_v + dt_{r(i,j)} - 0,5dd_{r(i,j)}\mathrm{tg}\alpha_v;$$

зазор между резьбой ролика с винтом для витка резьбы слева:

$$dx_{rv}^{L} = dx_v - dx_{r(i)} + dy_{r(i)}\mathrm{tg}\alpha_v + dt_{v(i,j)} - \\ - 0,5dd_{v(i,j)}\mathrm{tg}\alpha_v - dt_{r(i,j)} - 0,5dd_{r(i,j)}\mathrm{tg}\alpha_v;$$

зазор между резьбой ролика с гайкой для витка резьбы справа:

$$dx_{rg}^{R} = dx_{r(i)} - dy_{r(i)}\mathrm{tg}\alpha_g + dt_{r(i,j)} - \\ - 0,5dd_{r(i,j)}\mathrm{tg}\alpha_g - dt_{g(i,j)} + 0,5dd_{g(i,j)}\mathrm{tg}\alpha_g;$$

зазор между резьбой ролика с гайкой для витка резьбы слева:

$$dx_{rg}^{L} = -dx_{r(i)} - dy_{r(i)}\mathrm{tg}\alpha_g - dt_{r(i,j)} - \\ - 0,5dd_{r(i,j)}\mathrm{tg}\alpha_g + dt_{g(i,j)} + 0,5dd_{g(i,j)}\mathrm{tg}\alpha_g,$$

где dx_v — смещение винта; $dx_{r(i)}$ — смещение *i*-го ролика по оси *X*; $dy_{r(i)}$ — смещение *j*-го ролика по оси *Y*; $dt_{v(i,j)}$ — погрешность изготовления резьбы винта по шагу для каждого *j*-го витка резьбы *i*-го ролика; $dt_{g(i,j)}$ — погрешность изготовления резьбы гайки по шагу для каждого *j*-го витка резьбы *i*-го ролика; $dt_{r(i,j)}$ — погрешность изготовления резьбы ролика по шагу для каждого *j*-го витка резьбы *i*-го ролика; $dd_{v(i,j)}$ — погрешность изготовления резьбы винта по диаметру; $dd_{r(i,j)}$ — погрешность изготовления резьбы ролика по диаметру; $dd_{g(i,j)}$ — погрешность изготовления резьбы гайки по диаметру.

4. Если зазор имеет отрицательное значение, т. е. существует натяг между витками резьбы, определяем осевую нагрузку в контакте:

$$F_{Xv}^{R} = E\sqrt{R_{rv}\left(\frac{dx_{rv}^{R}\cos\alpha_v\cos\gamma_v}{n_\delta}\right)^3}\cos\alpha_v\cos\gamma_v,$$

где E — модуль упругости; n_δ — коэффициент сближения [1]; $R_{rv} = 1/K$ — приведённый радиус кривизны контакта винта и ролика; $K = 1/R_v + 1/R_r + 1/R$ — приведённая кривизна; $R_v = \frac{0,5d_v}{2\cos^2\gamma_v\cos\alpha_v}$ — радиус дуги боковой поверхности витка резьбы винта; $R_r = \frac{0,5d_r}{2\cos^2\gamma_r\cos\alpha_r}$ — радиус дуги боковой поверхности витка резьбы ролика; $R_g = \frac{-0,5d_g}{2\cos^2\gamma_g\cos\alpha_g}$ — радиус дуги боковой поверхности витка резьбы гайки; d_v — средний диаметр резьбы витка; d_r — средний диаметр резьбы ролика; d_g — средний диаметр резьбы гайки.

Для гайки:

$$F_{Xg}^{R} = E\sqrt{R_{rg}\left(\frac{dx_{rv}^{R}\cos\alpha_g\cos\gamma_g}{n_\delta}\right)^3}\cos\alpha_g\cos\gamma_g.$$

5. Определяются радиальные нагрузки в контакте:

$$F_{Yv}^{R} = \frac{F_{Xv}^{R}}{\mathrm{tg}\alpha_v};\quad F_{Yg}^{R} = \frac{F_{Xg}^{R}}{\mathrm{tg}\alpha_g}.$$

Для правых и левых витков радиальные нагрузки в контакте витков определяются аналогично.

6. Определяются суммарные осевые нагрузки, действующие на ролик со стороны винта и гайки, далее выполняется проверка, насколько они отличаются:

$$|\Sigma F_{Xvi} - \Sigma F_{Xgi}| < \varepsilon,$$

где F_{Xvi} — нагрузка от винта; F_{Xgi} — нагрузка от гайки; ε — допустимая ошибка.

Если разность нагрузок превышает допустимую ошибку, ролик смещается в направлении действия результирующей силы [8, 9].

7. Рассчитываются радиальные нагрузки.

8. Когда все ролики уравновешиваются, суммарная осевая сила от всех роликов сравнивается с внешней нагрузкой. При этом должно выполняться условие

$$\left|\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}F_{Xv_{i,j}} - F_X\right| < \varepsilon.$$

Если разница больше допустимой ошибки ε, винт смещается в сторону действия результирующей силы [10].

9. Когда винт и ролики уравновешены, смещение винта является суммой осевого люфта передачи и упругого мёртвого хода:

$$X_v = X_{v0} + X_{vK},$$

где X_v — общее смещение винта; X_{v0} — люфт; X_{vK} — упругий мёртвый ход.

Для определения люфта расчёт проводится с малой осевой нагрузкой, например $F_{X0} = 0{,}01F_X$.

10. Рассчитывается искомая осевая жёсткость:

$$KX = \frac{F_X\ [\text{Н}]}{X_{vK}\ [\text{мм}]}.$$

Погрешности изготовления резьбы по шагу и по диаметру рассчитываются случайным образом так, чтобы их распределение в поле допуска соответствовало нормальному закону распределения Гаусса.

Заключение. В настоящее время наиболее перспективным механизмом для преобразования вращательного движения в поступательное являются роликовые винтовые передачи [11—15]. Эти устройства широко используются в электромеханических приводах линейного перемещения. При высоких требованиях по точности позиционирования, предъявляемых к электромеханическим приводам, важными критериями работоспособности РВП являются упругий мёртвый ход и люфт.

Статья написана в соответствии с НИОКРТ «Создание высокотехнологичного производства высокомоментных малогабаритных ролико-винтовых редукторов, обеспечивающих импортозамещение и повышение конкурентоспособности в наукоёмких отраслях промышленности (станкостроительная, авиастроительная, судостроительная, электротехническая, нефтегазовая, энергетическое машиностроение)» в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации согласно постановлению Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений, государственных научных учреждений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

Библиографические ссылки

1. **Алексанин С.А., Егоров И.М., Федосовский М.Е.** и др. Математическое моделирование погрешностей изготовления элементов цевочной передачи планетарного редуктора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. СПб., Университет ИТМО. 2014. Т. 14. № 6. С. 171—176.

2. **Козырев В.В.** Конструкции ролико-винтовых передач и методика их проектирования. Владимир, ВГУ, 2004. С. 8—14.

3. **Блинов Д.С., Крылов С.И.** Планетарные ролико-винтовые механизмы. Конструкции. Методы расчетов / под ред. проф. О.А. Ряховского. М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. С. 66—78.

4. **Блинов Д.С., Ряховский О.А.** Численный метод определения точки первоначального контакта витков двух винтов с параллельными осями и различными углами подъема резьбы / Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение, Т. 3. 1996. С. 93—97.

5. **Блинов Д.С., Ряховский О.А.** Перспективные преобразователи вращательного движения в поступательное / Вестник машиностроения. 2008. Т. 10. С. 35—40.

6. **Егоров И.М., Алексанин С.А., Федосовский М.Е., Птицына А.С.** Влияние погрешностей элементов механизма параллельных кривошипов на кинематическую точность планетарного цевочного редуктора / Известия вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57. Вып. № 10. С. 76—80.

7. **Козырев В.В.** Сравнение шариковых и роликовых передач винт—гайка // Вестник машиностроения. 1983. Т. 10. С. 30—34.

8. **Козырев В.В.** Анализ и синтез ролико-винтовых передач как исполнительных механизмов электромеханических приводов: Дис. ... д-ра техн. наук. Владимир, 1995. 408 с.

9. **Козырев В.В.** Ролико-винтовые передачи — перспективные наукоемкие компоненты общемашиностроительного применения / Приводная техника. 1995. Т. 5. С. 28—30.

10. **Марголин Л.В.** Планетарная передача винт—гайка качения с резьбовыми роликами // Станки и инструмент. 1970. Т. 1. С. 42—43.

11. **Морозов В.В., Панюхин В.И.** Зубчато-винтовые передачи для преобразования вращательного движения в поступательное / под ред. В.В. Морозова, Владимир: Изд-во ВлГУ, 2000. 160 с.

12. **Ряховский О.А., Блинов Д.С.** Анализ работы планетарной ролико-винтовой передачи / Вестник МГТУ. Машиностроение. 1995. Т. 4. С. 52—57.

13. **Ефремова Г.Л.** К определению коэффициента полезного действия роликовых винтовых механизмов / Теория передач в машинах. М.: Наука, 1971. С. 96—101.

14. **Крайнев А.Ф.** Детали машин: словарь-справочник. М.: Машиностроение, 1992. 480 с.

15. **Fedosovskii M.E., Aleksanin S.A., Puctozerov R.V.** et al. The Effect of a Cycloid Reducer Geometry on its Loading Capacity // World Applied Sciences J. 2013. No. 24 (7). P. 895—899.

Ссылка для цитирования

Пустозеров Р.В., Юрьева Р.А., Анисимов И.В., Тулькова И.А. Описание метода определения осевой жёсткости деталей роликовых винтовых передач // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 12. С. 550—552.

УДК 628.97:621.385.2

А.А. Горбунов, канд. техн. наук, доц., **А.В. Балакин**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва),
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(Российский технологический университет МИРЭА)

mikaeva@npo.lit.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СПЕЦИАЛЬНЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП ДЛЯ ПОДСВЕТКИ АКВАРИУМОВ В СРАВНЕНИИ С ТРАДИЦИОННЫМИ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ ЛАМПАМИ

Представлены экспериментальные данные исследования электрических и светотехнических характеристик специальных люминесцентных ламп для освещения аквариумов в сравнении с традиционными люминесцентными лампами.

Ключевые слова: люминесцентная лампа; аквариум; спектр; характеристики; люминофор.

Experimental data on the investigation of electrical and lighting characteristics of special fluorescent lamps for illuminating aquariums in comparison with traditional fluorescent lamps are presented.

Keywords: fluorescent lamp; aquarium; range; characteristics; luminophore.

Освещение в значительной степени определяет внешний вид интерьера и обитателей аквариума. Красота природной окраски рыб будет проявляться в полной мере только в оптимально освещённом аквариуме. Жизнедеятельность и внешний вид аквариумных обитателей напрямую зависят от светового режима. Использование искусственного освещения позволяет обеспечить оптимальное освещение аквариума.

Для сравнения спектров излучения традиционных люминесцентных ламп со спектрами специальных ламп, применяемых для подсветки аквариумов, был проведён эксперимент. Для эксперимента использовали две специальные люминесцентные лампы для аквариумов разных производителей и три стандартные люминесцентные лампы с различным индексом цветопередачи [1, 2].

Характеристики люминесцентных ламп, заявленные производителями, представлены в табл. 1. Исследование электрических и светотехнических характеристик проводили с помощью гониофотометрического комплекса GO2000A и спектрорадиометра Specbos 1211 [3—5]. Результаты исследования электрических и светотехнических характеристик экспериментальных ламп показаны в табл. 2, 3.

Для сравнения спектров ламп были получены их спектры излучения. Из полученных результатов следует, что в спектрах специальных люминесцентных ламп преобладают синяя, зелёная и оранжевые составляющие. В спектре излучения лампы Sylvania Aquastar доминирующая длина волны — 434 нм (визуально наблюдался розово-фиолетовый цвет свечения), в спектре лампы Hagen Power-Glo доминирующая длина волны — 544 нм (визуально наблюдался голубой цвет свечения).

Таблица 1

Заявленные производителями характеристики используемых в эксперименте люминесцентных ламп

Марка лампы	Потребляемая мощность, Вт	Световой поток, лм	Индекс цветопередачи R_a	Цветовая температура, К	Срок службы, ч	Цоколь
Sylvania Aquastar	18	900	48	10 000	10 000	G13
Hagen Power-Glo	20	750	70...80	18 000	9000	—"—
Osram Basic L18W/765	18	1080	72	6500	13 000	—"—
Lisma FL18W/765	18	1200	75	6500	13 000	—"—
Lisma FL18W/640	18	1200	65	4000	13 000	—"—

Таблица 2

Электрические характеристики ламп

Марка лампы	Мощность, Вт	Сила тока, А	Напряжение, В
Sylvania Aquastar	15,27	0,0771	220
Hagen Power-Glo	21,19	0,1882	219,8
Osram Basic L18W/765	15,37	0,1177	220
Lisma FL18W/765	15,15	0,1165	219,9
Lisma FL18W/640	15,23	0,1166	220

Таблица 3

Светотехнические характеристики ламп

Марка лампы	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	cosφ	Индекс цветопередачи, R_a	Доминирующая длина волны, нм	Цветовая температура, K
Sylvania Aquastar	271,2	17,8	0,8999	—	434	—
Hagen Power-Glo	299,8	7,28	0,4979	—	544	—
Osram Basic L18W/765	609,24	39,64	0,5934	—	435	—
Lisma FL18W/765	602,94	39,8	0,5913	71,58	435	6089
Lisma FL18W/640	643,66	42,26	0,5941	—	435	—

Производители представленных образцов ламп утверждают, что они усиливают окраску рыб, делая её более яркой и интенсивной, а цвета и оттенки растений — более выраженными. При этом следует учитывать, что освещение в аквариумах применяется в целях демонстрации красоты экосистемы аквариума наблюдателю. Часто в общественных местах, где есть аквариумы, в качестве подсветки используются именно специальные люминесцентные лампы. Поэтому было решено провести исследование по восприятию основных цветов, которые чаще всего встречаются в окрасе представителей флоры и фауны аквариумов [4].

Для того чтобы определить степень восприятия цветов, были выбраны шесть основных цветов: красный, оранжевый, жёлтый, зелёный, синий, фиолетовый и два дополнительных — золотой (металлизированный) и серебряный (металлизированный).

В качестве тест-объекта использовали экспериментальную цветовую пирамиду, включающую шесть основных цветов и металлизированную фольгу для исследования двух дополнительных цветов.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что по восприятию выбранные цвета при освещении специальными и обычными люминесцентными лампами сильно различаются. При свете специальных ламп цвета приобретают совершенно разные оттенки, скорее всего, это связано с наличием значительной синей области в спектре по сравнению с обычными лампами. Также особое внимание следует уделить и тому, что зелёный цвет стал голубоватым. Это очень важно, так как при использовании таких источников в аквариумах с большим количеством растительности будет нарушена цветовая гамма зелени, что приведёт к нарушению восприятия общего вида аквариума. Из всех исследуемых ламп наиболее естественную цветопередачу обеспечивает люминесцентная лампа Osram Basic L18W/765.

На основе результатов исследований можно сделать вывод о том, что утверждение производителей специальных люминесцентных ламп об усилении естественного окраса рыб является спорным.

Полученные при исследовании электрических и светотехнических характеристик данные, свидетельствуют о том, что в спектрах специальных люминесцентных ламп преобладают синяя, зелёная и оранжевые составляющие. Поскольку состав люминофора специальных ламп отличается от состава традиционных ламп, в спектре специальных ламп преобладали эти составляющие, что повлияло на цвет их излучения.

Результаты исследования степени восприятия цвета показывают, что при освещении специальными лампами цвета приобретают различные оттенки, отличающиеся от оттенков, наблюдаемых при освещении обычными лампами. Наиболее естественную цветопередачу продемонстрировала люминесцентная лампа Osram Basic L18W/765.

Библиографические ссылки

1. **Козлов И.Н., Горбунов А.А., Калинин А.Д.** Современные источники света для освещения аквариумов // XLIV Огаревские чтения: материалы науч. конф. 2016. С. 10—16.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РусАнс, 2017. С. 136.

3. **Козлов И.Н., Балакин А.В., Горбунов А.А.** Использование специальных люминесцентных и светодиодных источников света для подсветки аквариумов // Материалы XX Науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. 2016. С. 104—108.

4. **Балакин А.В., Горбунов А.А.** Исследование влияния спектров люминесцентных ламп на цветовое восприятие объекта // Материалы XXI Науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва. 2017. С. 240—243.

5. **Амелькина С.А., Железникова О.Е., Микаева С.А.** Экспериментальная исследовательская установка со светодиодными источниками света// Автоматизация. Современные технологии. 2015. № 2. С. 37—40.

Ссылка для цитирования

Горбунов А.А., Балакин А.В., Микаева С.А. Исследование характеристик специальных люминесцентных ламп для подсветки аквариумов в сравнении с традиционными люминесцентными лампами // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 12. С. 553—554.

УДК 681.518

В.В. Клычников, М.С. Селезнева, канд. техн. наук, **К.А. Неусыпин,** д-р техн. наук, проф., **А.В. Пролетарский,** д-р техн. наук, проф., **Шэнь К.,** канд. техн. наук, **Лу В., Сюетин Ч.**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

selezneva@mail.ru

АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены нелинейная и линейная модели погрешностей инерциальных навигационных систем. Повышение точности определения навигационной информации осуществляется алгоритмическим путём. Исследованы алгоритмы коррекции инерциальных навигационных систем различных классов точности: линейный и нелинейный адаптивные фильтры Калмана. Качество работы представленных алгоритмов продемонстрировано с помощью моделирования по данным полунатурного эксперимента с системой АИСТ-350. Проведена оценка вычислительных затрат, необходимых при реализации алгоритмов на борту летательного аппарата.

Ключевые слова: алгоритм коррекции; инерциальная навигационная система; фильтр Калмана; алгоритм оценивания.

Nonlinear and linear models of inertial navigation systems errors are considered. Increasing the accuracy of determining navigation information is realized algorithmically. Correction algorithms for inertial navigation systems of different accuracy classes are researched: linear and nonlinear adaptive Kalman filters. The quality of the presented algorithms is demonstrated by modeling from the data of a semi-real experiment with the AIST-350 system. An estimation of the computational costs necessary for the realization of algorithms on board an aircraft is carried out.

Keywords: correction algorithm; inertial navigation system; Kalman filter; estimation algorithm.

Введение. Управление динамическими объектами обычно осуществляется на основе текущей информации о состоянии управляемого объекта. Для определения информации используются различные навигационные системы и системы ориентации [1, 2]. Управление летательными аппаратами (ЛА) и другими высокоточными динамическими объектами проводится с помощью навигационных комплексов (НК) [3—5]. Как правило, базовой системой НК является инерциальная навигационная система (ИНС). ИНС имеют погрешности, которые компенсируются алгоритмическим путём [6—8]. Современные корректируемые ИНС обладают высокой точностью, однако их характеристики зависят от точности алгоритмов коррекции. Алгоритмическое обеспечение ИНС реализуется в специальных вычислителях или бортовых цифровых вычислительных машинах (БЦВМ) ЛА. Алгоритмы коррекции отличаются точностью, быстродействием, а также требованиями к мощности БЦВМ и объёму памяти, отводимой для их реализации.

При проектировании НК ЛА, решении задач компоновки и определения состава НК руководствуются требованиями по точности навигационных систем, их стоимости и возможностями реализации алгоритмического обеспечения НК. Однако при решении этой задачи целесообразно руководствоваться не точностью отдельных навигационных систем, а возможной достижимой точностью корректируемых систем. Для этого необходимо рассмотреть различные алгоритмы коррекции, проанализировать их точность и вычислительные затраты при реализации на борту ЛА. Алгоритмическое обеспечение современных НК включает алгоритмы предварительной и вторичной обработки информации. Алгоритмы предварительной обработки информации осуществляют сглаживание измерительных сигналов и предварительную грубую фильтрацию. Вторичная обработка информации предполагает применение более сложных и точных алгоритмов, например фильтра Калмана [9, 10]. Как правило, алгоритмы вторичной обработки информации предполагают использование математических моделей исследуемых процессов, например моделей погрешностей ИНС различного уровня подробности [11, 12]. Алгоритмы обладают различными точностными характеристиками и, соответственно, вычислительными требованиями при реализации на борту ЛА.

В статье рассмотрены различные модели погрешностей ИНС, в которых применяются эти модели, представлены результаты моделирования алгоритмов оценивания с использованием данных лабораторного эксперимента с системой АИСТ-350, а также проведена оценка вычислительных затрат при реализации алгоритмов.

Нелинейная модель погрешностей ИНС. Для решения задач навигации, ориентации, управления и наведения ЛА необходимо определить системы отсчёта и модель навигационного пространства (МНП) [1]. Основой при построении МНП Земли является эллипсоид вращения, а также используются правые координатные трёхгранники:

инерциальный трёхгранник $OX_{\text{и}}Y_{\text{и}}Z_{\text{и}}$ — это не участвующий в суточном вращении Земли трёхгранник, вершина которого совпадает с центром земного эллипсоида, а ось $OZ_{\text{и}}$ направлена вдоль малой полуоси эллипсоида;

земной координатный трёхгранник $OX_{\text{з}}Y_{\text{з}}Z_{\text{з}}$, вершина которого совмещена с центром земного эллипсоида, ось $OX_{\text{з}}$ направлена на точку пересечения экватора и гринвичского меридиана, а ось $OZ_{\text{з}}$ направлена вдоль малой полуоси эллипсоида;

географический координатный трёхгранник $OENH$, ось OE которого направлена по касательной к параллели на восток, ось ON направлена по касательной к меридиану на север, а ось OH совпадает с нормалью к эквидистантной поверхности;

опорный (сопровождающий) координатный трёхгранник $O\xi\eta\zeta$, оси $O\xi$ и $O\eta$ которого лежат в касательной плоскости эквидистантной поверхности и заданным образом ориентированы относительно местного меридиана, а ось $O\zeta$ совпадает с осью OH географического координатного трёхгранника $OENH$;

связанный координатный трёхгранник $OX_{\text{с}}Y_{\text{с}}Z_{\text{с}}$, вершина которого находится в центре масс ЛА, продольная ось $OX_{\text{с}}$ и нормальная ось $OY_{\text{с}}$ лежат в плоскости симметрии ЛА, ось $OX_{\text{с}}$ направлена от хвостовой к носовой части ЛА, а ось $OY_{\text{с}}$ — в верхнюю часть ЛА, боковая ось $OZ_{\text{с}}$ перпендикулярна к плоскости $OX_{\text{с}}Y_{\text{с}}$ и направлена в сторону правого крыла ЛА.

Идеальная модель i-й системы для обработки навигационной информации имеет вид

$$\mathbf{N}^i = \Psi^i(\mathbf{\Pi}^i, \mathbf{M}^i), \qquad (1)$$

где $\mathbf{N}^i$ — многомерный вектор состояния объекта; Ψ^i — нелинейная модель i-й системы; $\mathbf{\Pi}^i$ — многомерный вектор параметров информационного поля навигационного пространства [1], используемого при обработке информации; $\mathbf{M}^i$ — многомерный вектор измерительной информации, элементами которого являются непосредственно измеряемые параметры.

Многомерный вектор состояния объекта $\mathbf{N}^i$ включает в себя координаты и составляющие линейной скорости измерительного центра канала, а также параметры ориентации связанного с измерительным центром координатного трёхгранника относительно географического трёхгранника.

При практической реализации модели навигационной системы неизбежно возникают погрешности, которые математически могут быть представлены в виде многомерных векторов:

погрешности начальной установки $\Delta\mathbf{N}_0^i$;

погрешности определения параметров информационного поля $\Delta\mathbf{\Pi}^i$;

погрешности измерительной информации $\Delta\mathbf{M}^i$;

погрешности $\Delta\Psi^i$ неточности реализации оператора Ψ^i.

При этом все компоненты выражения (1) искажаются:

$$\mathbf{N}_R^i = \Psi_R^i(\mathbf{\Pi}_R^i, \mathbf{M}_R^i), \qquad (2)$$

где $\mathbf{N}_R^i$, $\mathbf{\Pi}_R^i$, $\mathbf{M}_R^i$ — многомерные векторы при практической реализации модели навигационной системы; Ψ_R^i — нелинейная модель при её практической реализации.

Полученное выражение (2) можно называть полной нелинейной моделью i-й системы. Соответственно, нелинейная модель погрешностей i-й системы имеет вид

$$\begin{aligned}\Delta\mathbf{N}^i &= \mathbf{N}_R^i - \mathbf{N}^i = \Psi_R^i(\mathbf{\Pi}_R^i, \mathbf{M}_R^i) - \Psi^i(\mathbf{\Pi}^i, \mathbf{M}^i) = \\ &= \Xi^i(\mathbf{\Pi}^i, \mathbf{M}^i, \Delta\mathbf{N}_0^i, \Delta\mathbf{\Pi}^i, \Delta\mathbf{M}^i).\end{aligned} \qquad (3)$$

Оператор Ξ^i описывает однозначную, но не единственную связь между погрешностями навигационных параметров, измерительных датчиков и определения геометрических и гравитационных характеристик навигационного пространства при заданном движении объекта.

Рассмотрим в качестве примера известные модели погрешностей ИНС [4]. В качестве тестовой модели использована типовая модель ошибок платформенной ИНС [1, 13]. Платформенная система координат отличается от навигационной системы координат на углы рассогласования φ_E, φ_N и φ_{up}. Разница между платформенной и навигационной угловой скоростью обусловлена дрейфом гироскопа ω_E^{dr}, ω_N^{dr}, ω_{up}^{dr} и ошибками в расчёте указанных скоростей с использованием показаний датчиков $\Delta\omega_E$, $\Delta\omega_N$, $\Delta\omega_{up}$. Система уравнений ошибок ИНС имеет вид [1]

$$
\begin{cases}
\omega_E^{dr} - \dfrac{\delta V_N}{R} = (\cos\varphi_{up} - 1)\omega_E^{LL} + \sin\varphi_{up}\omega_N^{LL} - \varphi_N\omega_{up}^{LL} + \dot{\varphi}_E; \\
\omega_N^{dr} + \dfrac{V_E}{R} - U\sin\varphi\delta\varphi = -\sin\varphi_{up}\omega_E^{LL} + (\cos\varphi_{up} - 1)\omega_N^{LL} + \varphi_E\omega_{up}^{LL} + \dot{\varphi}_N; \\
\omega_{up}^{dr} + \dfrac{\delta V_E}{R} + U\cos\varphi\delta\varphi + \dfrac{V_E}{R}\sec^2\varphi\delta\varphi = (\varphi_N\cos\varphi_{up} + \varphi_E\sin\varphi_{up})\omega_E^{LL} + \\
+ (\varphi_N\sin\varphi_{up} - \varphi_E\cos\varphi_{up})\omega_N^{LL} + \dot{\varphi}_{up}; \\
\delta\dot{V}_E = (\cos\varphi_{up} - 1)a_E^{LL} + \sin\varphi_{up}a_N^{LL} - \varphi_N a_{up}^{LL} + B_E + a_E\mu_E + \left(2U\sin\varphi + \dfrac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi\right)\delta V_N + \\
+ V_N U\cos\varphi\delta\varphi + \dfrac{\delta V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi V_N + \left(U\cos\varphi + \dfrac{V_E}{R}\sec^2\varphi\right)V_N\delta\varphi; \\
\delta\dot{V}_N = -\sin\varphi_{up}a_E^{LL} + (\cos\varphi_{up} - 1)a_N^{LL} + \varphi_E a_{up}^{LL} + B_N + a_N\mu_N - \left(2U\sin\varphi + \dfrac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi\right)\delta V_E - \\
- V_E U\cos\varphi\delta\varphi - \dfrac{\delta V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi V_E - \left(U\cos\varphi + \dfrac{V_E}{R}\sec^2\varphi\right)V_E\delta\varphi; \\
\delta\dot{\varphi} = -\dfrac{\delta V_N}{R}; \\
\delta\dot{\lambda} = \dfrac{\delta V_E}{R\cos\varphi} + \dfrac{V_E\mathrm{tg}\varphi}{R\cos\varphi}\delta\varphi,
\end{cases}
\tag{4}
$$

где V_E, δV_E, δV_N — скорости в навигационной системе координат и их ошибки; φ, $\delta\varphi$ — широта и её ошибка; U — угловая скорость вращения Земли; B_i — смещение нуля акселерометра; μ_i — ошибки масштабного коэффициента; $\delta\Delta\alpha_i$ — ошибки вычисления кориолисовых поправок.

Перепишем систему уравнений (4) в матричном виде:

$$X_k = \Phi X_{k-1} + W_{k-1} + F; \tag{5}$$

$$X_{k-1} = \begin{bmatrix} \delta V_E \\ \delta V_N \\ \varphi_E \\ \varphi_N \\ \varphi_{up} \\ \delta\varphi \\ \delta\lambda \end{bmatrix};$$

$$
\Phi = \begin{vmatrix}
\dfrac{1}{R}\mathrm{tg}\varphi V_N & \left(2U\sin\varphi + \dfrac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi\right) & 0 & -a_{up} & a_N & \left(V_N U\cos\varphi + \dfrac{V_N^2}{R}\sec^2\varphi\right) & 0 \\
-\left(2U\sin\varphi + \dfrac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi\right) & 0 & a_{up} & 0 & -a_E & -\left(\dfrac{V_E^2}{R}\sec^2\varphi + 2V_E U\cos\varphi\right) & 0 \\
0 & -\dfrac{1}{R} & 0 & \omega_{up} & -\omega_N & 0 & 0 \\
\dfrac{1}{R} & 0 & -\omega_{up} & 0 & \omega_E & -U\sin\varphi & 0 \\
\dfrac{1}{R}\mathrm{tg}\varphi & 0 & \omega_N & -\omega_E & 0 & \left(U\cos\varphi + \dfrac{V_E}{R}\sec^2\varphi\right) & 0 \\
0 & \dfrac{1}{R} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\dfrac{1}{R\cos\varphi} & 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{V_E}{R\cos\varphi}\mathrm{tg}\varphi & 0
\end{vmatrix};
$$

$$W_{k-1} = \begin{bmatrix} B_E + a_E\mu_E \\ B_N + a_N\mu_N \\ \omega_E^{dr} \\ \omega_N^{dr} \\ \omega_{up}^{dr} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$F = \begin{bmatrix} -a_E\left(\frac{\varphi_{up}^2}{2} - \frac{\varphi_{up}^4}{24}\right) - a_N\left(\frac{\varphi_{up}^3}{6} - \frac{\varphi_{up}^5}{120}\right) \\ -a_N\left(\frac{\varphi_{up}^2}{2} - \frac{\varphi_{up}^4}{24}\right) + a_E\left(\frac{\varphi_{up}^3}{6} - \frac{\varphi_{up}^5}{120}\right) \\ \omega_E\left(\frac{\varphi_{up}^2}{2} - \frac{\varphi_{up}^4}{24}\right) + \omega_N\left(\frac{\varphi_{up}^3}{6} - \frac{\varphi_{up}^5}{120}\right) \\ \omega_N\left(\frac{\varphi_{up}^2}{2} - \frac{\varphi_{up}^4}{24}\right) - \omega_E\left(\frac{\varphi_{up}^3}{6} - \frac{\varphi_{up}^5}{120}\right) \\ \left(\omega_E\varphi_N - \omega_N\varphi_E\right)\left(\frac{\varphi_{up}^2}{2} - \frac{\varphi_{up}^4}{24}\right) - \\ -\left(\omega_E\varphi_E - \omega_N\varphi_N\right)\left(\varphi_{up} - \frac{\varphi_{up}^3}{6} + \frac{\varphi_{up}^5}{120}\right) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

где F — нелинейная часть.

Таким образом, уравнение (5) представляет собой нелинейную модель ошибок ИНС в матричной форме.

Линеаризованная модель погрешностей навигационных систем. Раскладывая выражение (2) в ряд Тейлора в окрестности точного решения, соответствующего идеальной модели (1), можно получить линеаризованную модель навигационной системы вида

$$\mathbf{N}_R^i = \mathbf{N}^i + \frac{\partial\Psi^i}{\partial N^i}\Delta\mathbf{N}^i + \frac{\partial\Psi^i}{\partial\mathbf{\Pi}^i}\Delta\mathbf{\Pi}^i + \frac{\partial\Psi^i}{\partial M^i}\Delta\mathbf{M}^i + \\ + \Delta\Psi^i(\mathbf{\Pi}^i, \mathbf{M}^i) + O^2, \quad (6)$$

где O^2 — величина второго и высших порядков малости относительно погрешностей.

Как правило, при решении задачи навигации величинами высших порядков малости можно пренебречь и получить линеаризованную модель погрешностей i-й системы в виде

$$\Delta\mathbf{N}^i = \mathbf{N}_R^i - \mathbf{N}^i = \frac{\partial\Psi^i}{\partial\mathbf{N}^i}\Delta\mathbf{N}^i + \frac{\partial\Psi^i}{\partial\mathbf{\Pi}^i}\Delta\mathbf{\Pi}^i + \\ + \frac{\partial\Psi^i}{\partial\mathbf{M}^i}\Delta\mathbf{M}^i + \Delta\Psi^i(\mathbf{\Pi}^i, \mathbf{M}^i). \quad (7)$$

В практическом приложении линеаризованные уравнения погрешностей навигационной системы (например, ИНС) имеют вид [7—9]

$$\begin{aligned} &\delta\dot{V}_E = a_N\Phi_H - g\Phi_N + \\ &+\left(\frac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi + 2U\sin\varphi\right)\delta V_N + \frac{V_N}{R}\mathrm{tg}\varphi\delta V_E + \\ &+\left(\frac{V_E V_N}{R}\sec^2\varphi + 2V_N U\cos\varphi\right)\delta\varphi + \Delta V_E; \\ &\delta\dot{V}_N = g\Phi_E - a_E\Phi_H - \\ &-\left(\frac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi + 2U\sin\varphi\right)\delta V_E - \frac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi\delta V_E - \\ &-\left(\frac{V_E^2}{R}\sec^2\varphi + 2V_E U\cos\varphi\right)\delta\varphi + \Delta V_N; \\ &\dot{\Phi}_E - \left(\frac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi + U\sin\varphi\right)\Phi_N + \\ &+\left(\frac{V_E}{R} + U\cos\varphi\right)\Phi_H = \varepsilon_E - \frac{\delta V_N}{R}; \\ &\dot{\Phi}_N + \frac{V_N}{R}\Phi_H + \left(\frac{V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi + U\sin\varphi\right)\Phi_E = \\ &= \varepsilon_N + \frac{\delta V_E}{R} - U\sin\varphi\delta\varphi; \\ &\dot{\Phi}_H - \left(\frac{V_E}{R} + U\cos\varphi\right)\Phi_E - \frac{V_N}{R}\Phi_N = \\ &= \varepsilon_H + \frac{\delta V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi + \left(U\cos\varphi + \frac{V_E}{R}\sec^2\varphi\right)\delta\varphi; \\ &\delta\dot{\varphi} = \frac{\delta V_N}{R}; \\ &\delta\dot{\lambda} = \frac{\delta V_E}{R\cos\varphi} + \frac{V_E\mathrm{tg}\varphi}{R\cos\varphi}\delta\varphi, \end{aligned} \quad (8)$$

где δV_E, δV_N — составляющие погрешности в определении путевой скорости ЛА; V_E, V_N — составляющие путевые скорости; ΔV_E, ΔV_N — инструментальные погрешности горизонтальных акселерометров; a_E, a_N — составляющие ускорения ЛА; Φ_E, Φ_N, Φ_H — углы отклонения гиростабизированной платформы (ГСП) относительно опорной системы координат; ε_E, ε_N, ε_H — проекции скорости дрейфа ГСП на её же оси; φ, λ — широта и азимут местоположения; $\delta\varphi$, $\delta\lambda$ — погрешность определения системой широты и азимута ЛА; U — скорость вращения Земли; R — радиус Земли; g — ускорение силы тяжести.

На практике для разработки алгоритмического обеспечения, как правило, используются упрощённые уравнения погрешностей ИНС:

$$\begin{aligned}
\delta\dot{V}_E &= a_N\Phi_H - g\Phi_N + \Delta\dot{V}_E;\\
\delta\dot{V}_N &= g\Phi_E - a_E\Phi_H + \Delta\dot{V}_N;\\
\dot{\Phi}_E &= \varepsilon_E - \frac{\delta V_N}{R} + \omega_H\Phi_N - \omega_N\Phi_H;\\
\dot{\Phi}_N &= \varepsilon_N + \frac{\delta V_E}{R} - \omega_H\Phi_E + \omega_E\Phi_H;\\
\dot{\Phi}_H &= \varepsilon_H + \frac{\delta V_E}{R}\operatorname{tg}\varphi + \omega_N\Phi_E - \omega_E\Phi_N;\\
\dot{\varepsilon}_E &= -\mu\varepsilon_E + w_E(t);\\
\dot{\varepsilon}_N &= -\mu\varepsilon_N + w_N(t);\\
\dot{\varepsilon}_H &= -\mu\varepsilon_H + w_H(t),
\end{aligned} \tag{9}$$

где ω_E, ω_N, ω_H — проекции абсолютной угловой скорости ГСП на её оси; w_E, w_N, w_H — возмущающие внешние воздействия; μ — средняя частота случайного изменения дрейфа.

В матричной форме уравнения (9) имеют вид

$$\dot{\mathbf{x}} = \Phi\mathbf{x} + \mathbf{w}, \tag{10}$$

где

$$\mathbf{x} = [\delta V_E\ \delta V_N\ \Phi_E\ \Phi_N\ \Phi_H\ \varepsilon_E\ \varepsilon_N\ \varepsilon_H]^T;$$

$$\mathbf{w} = [\Delta\dot{V}_E\ \Delta\dot{V}_N\ 0\ 0\ 0\ w_E(t)\ w_N(t)\ w_H(t)]^T;$$

$$\Phi = \begin{bmatrix}
0 & 0 & 0 & -g & a_N & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & g & 0 & a_E & 0 & 0 & 0\\
0 & -\frac{1}{R} & g & \omega_H & -\omega_N & 1 & 0 & 0\\
\frac{1}{R} & 0 & -\omega_H & 0 & \omega_E & 0 & 1 & 0\\
\frac{1}{R}\operatorname{tg}\varphi & 0 & -\omega_N & -\omega_E & 0 & 0 & 0 & 1\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu
\end{bmatrix}.$$

Пренебрегая угловыми скоростями ω_E, ω_N, ω_H из-за их малых значений, а также инструментальными погрешностями акселерометров ΔV_E, ΔV_N, уравнения (10) в дискретной матричной форме имеют вид

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1}, \tag{11}$$

где

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix}\delta V_E & \delta V_N & \Phi_E & \Phi_N & \Phi_H & \varepsilon_E & \varepsilon_N & \varepsilon_H\end{bmatrix}^T;$$

$$\mathbf{w}_{k-1} = \begin{bmatrix}B_E & B_N & 0 & 0 & 0 & w_E & w_N & w_H\end{bmatrix}^T;$$

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & -gT & a_NT & 0 & 0 & 0\\
0 & 1 & gT & 0 & -a_ET & 0 & 0 & 0\\
0 & -\frac{T}{R} & 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0\\
\frac{T}{R} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0\\
\frac{T}{R}\operatorname{tg}\varphi & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\mu T
\end{bmatrix};$$

B_E, B_N — смещение нулей акселерометров; T — период дискретизации.

Погрешности ИНС на практике для одного из горизонтальных информационных каналов моделируются с помощью следующей математической модели [14, 15]:

$$\mathbf{x}_k = \Phi_{k,k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \Gamma_{k-1}\mathbf{w}_{k-1}, \tag{12}$$

где

$$\mathbf{x}_k = \begin{bmatrix}\delta V_k\\ \varphi_k\\ \varepsilon_k\end{bmatrix};\ \mathbf{w}_{k-1} = \begin{bmatrix}B_{k-1}\\ 0\\ w_{k-1}\end{bmatrix};$$

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix}1 & -gT & 0\\ \frac{T}{R} & 1 & T\\ 0 & 0 & 1-\mu T\end{bmatrix};\ \Gamma_{k-1} = \begin{bmatrix}T & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \Lambda T\sqrt{2\mu}\end{bmatrix};$$

B_{k-1}, w_{k-1} — дискретные аналоги белого гауссовского шума; Λ — среднеквадратическое отклонение случайного значения дрейфа; $\mathbf{w}_k$ — дискретный аналог гауссовского белого шума с нулевыми математическим ожиданием и матрицей ковариаций $\mathbf{Q}_k$.

Таким образом, получены уравнения ошибок навигационной системы в дискретной форме, которые используются в дальнейшем при разработке алгоритмов.

Адаптивный линейный фильтр Калмана. Рассмотрим дискретное линейное уравнение, описывающее динамический объект, например, изменение погрешностей ИНС в форме (12).

Часть вектора состояния измеряется как

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k, \tag{13}$$

где $\mathbf{z}_k$ — вектор измерений; $\mathbf{H}_k$ — матрица измерений; $\mathbf{v}_k$ — вектор ошибок измерения.

Ошибки измерений $\mathbf{v}_k$ предположительно являются дискретным аналогом гауссовского белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей $\mathbf{R}_k$. Ошибки измерения (иначе измерительный шум) и входные возмущения (иначе входной шум) некоррелированы: $E[\mathbf{v}_j\mathbf{w}_k^T]=0$ при любых j и k.

Начальное значение вектора состояния полагаем не зависящим от входных возмущений и ошибок измерений, т. е. $E[\mathbf{x}_0\mathbf{w}_k^T]=0$ и $E[\mathbf{x}_0\mathbf{v}_k^T]=0$ для любого k Ковариационная матрица $E[\mathbf{x}_0\mathbf{x}_0^T]=\mathbf{P}_0$ представляет собой неотрицательно определённую матрицу.

Требуется на основе математического ожидания объекта, априорной информации о статистических характеристиках входных и измерительных шумов, осуществляя измерения части вектора состояния, оценить вектор состояния так, чтобы функционал J_k принимал минимальное значение [4]:

$$J_k = E[(\mathbf{x}_k-\hat{\mathbf{x}}_k)^T(\mathbf{x}_k-\hat{\mathbf{x}}_k)] \to \min, \quad (14)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$ — оценка вектора состояния.

Оптимальная оценка вектора состояния определяется из уравнения

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \Phi_{k,k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{K}_k\boldsymbol{\upsilon}_k, \quad (15)$$

где $\mathbf{K}_k$ — матрица усиления фильтра; $\boldsymbol{\upsilon}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k\Phi_{k,k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ — обновляемая последовательность.

Уравнение (15) имеет следующий физический смысл. На основе оценки вектора состояния и матрицы объекта производится прогноз для следующего шага вычисления оценки. Одновременно производится коррекция этого прогноза с помощью обновляемой последовательности, которая представляет собой совокупность ошибки прогноза и измерительного шума.

Матрица усиления фильтра определяет вес, с которым обновляемая последовательность участвует в формировании оценки вектора состояния. В случае проведения идеальных измерений, т. е. когда измерительный шум отсутствует, матрица усиления выбирается максимальной. Чем больше измерительный шум, тем с меньшим весом учитывается обновляемая последовательность при формировании оценки вектора состояния.

Уравнения фильтра Калмана имеют вид

$$\begin{aligned}
&\hat{\mathbf{x}}_k = \Phi_{k,k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{K}_k\boldsymbol{\upsilon}_k;\\
&\boldsymbol{\upsilon}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k\Phi_{k,k-1}\hat{\mathbf{x}}_{k-1};\\
&\mathbf{P}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1}\mathbf{P}_{k-1}\Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1}\mathbf{Q}_{k-1}\Gamma_{k-1}^T; \quad (16)\\
&\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1};\\
&\mathbf{P}_k = (\mathbf{I}-\mathbf{K}_k\mathbf{H}_k)\mathbf{P}_{k,k-1},
\end{aligned}$$

где $\mathbf{P}_{k,k-1}$ — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; $\mathbf{P}_k$ — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания; $\mathbf{I}$ — единичная матрица.

С помощью фильтра Калмана осуществляется не только восстановление всего вектора состояния системы, но и подавляется влияние измерительного шума. Достаточно высокой точностью и в то же время простотой реализации в БЦВМ отличаются адаптивные алгоритмы оценивания, являющиеся прямыми модификациями фильтра Калмана.

Адаптивный алгоритм оценивания [1], способный функционировать в условиях отсутствия достоверной статистической информации о входном шуме, отличается от фильтра Калмана видом уравнения для определения априорной ковариационной матрицы ошибок оценивания, которое записывается в следующей форме:

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1}\mathbf{P}_{k-1}\Phi_{k,k-1}^T + \mathbf{K}_k E[\boldsymbol{\upsilon}_k\boldsymbol{\upsilon}_k^T]\mathbf{K}_k^T. \quad (17)$$

Адаптивный алгоритм оценивания имеет следующий вид:

$$\mathbf{K}_k = \begin{cases}\mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T E[\boldsymbol{\upsilon}_k\boldsymbol{\upsilon}_k^T]^{-1} \text{ при}\\ \operatorname{diag}\{E[\boldsymbol{\upsilon}_k\boldsymbol{\upsilon}_k^T]\} > \operatorname{diag}(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T);\\ \mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T[\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T]^{-1} \text{ при}\\ \operatorname{diag}\{E[\boldsymbol{\upsilon}_k\boldsymbol{\upsilon}_k^T]\} \leqslant \operatorname{diag}(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T).\end{cases} \quad (18)$$

Вычисление математического ожидания $E[\boldsymbol{\upsilon}_k\boldsymbol{\upsilon}_k^T]$ в адаптивном алгоритме производится в соответствии с формулой

$$E[\boldsymbol{\upsilon}_k\boldsymbol{\upsilon}_k^T] = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}(\boldsymbol{\upsilon}_j\boldsymbol{\upsilon}_j^T). \quad (19)$$

Дальнейшее повышение точности оценивания достигается путём использования более точных и сложных в реализации нелинейных алгоритмов оценивания.

Адаптивный нелинейный фильтр Калмана. Пусть уравнение для вектора состояния имеет вид

$$\mathbf{x}_k = \Phi_k(\mathbf{x}_{k-1}) + w_k, \qquad (20)$$

где $\mathbf{x}_k$ — вектор состояния; $\Phi_k(x_{k-1})$ — вектор нелинейной модели, характеризующий динамику исследуемого процесса.

Часть вектора состояния измеряется с помощью навигационных систем ИНС и GPS:

$$\mathbf{z}_k = H_k x_k + v_k, \qquad (21)$$

где $\mathbf{z}_k$ — вектор измерений; H_k — матрица измерений; w_k и v_k — дискретные аналоги гауссовского белого шума с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами ковариаций Q_k и R_k соответственно, некоррелированные между собой.

Уравнения нелинейного фильтра Калмана имеют следующий вид [5, 6]:

$$\begin{aligned}
&\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} + K(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})[\mathbf{z}_k - H_k\hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}];\\
&\hat{\mathbf{x}}_k = \Phi_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1});\\
&K_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) = P_{k,k-1}H_k^T[H_kP_{k,k-1}H_k^T + R_k]^{-1}; \quad (22)\\
&P_{k,k-1} = \frac{\partial\Phi_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial\mathbf{x}_{k-1}^T}P_{k-1}\left[\frac{\partial\Phi_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial\mathbf{x}_{k-1}^T}\right]^T + Q;\\
&P_k = [I - K_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})H_k]P_{k,k-1},
\end{aligned}$$

где $K_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})$ — матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана.

Измерения нелинейно зависят от компонент вектора состояния объекта [1]. На погрешность ИНС оказывают влияние многообразные возмущающие факторы, многие из которых коррелированы и, как правило, описываются с помощью вероятностных характеристик или стохастических уравнений. Однако достоверная априорная информация о статистических характеристиках на практике отсутствует. Оценивая погрешности ИНС при использовании сложных моделей, необходимо осуществлять идентификацию параметров и структуры модели в процессе функционирования системы. Подобные задачи решают, например, с помощью синтеза алгоритмов оценивания в рамках нейросетевого подхода. Реализация алгоритмов с нейросетью сопряжена с проблемами вычислительного характера.

Наиболее полно учесть все особенности характера изменения погрешностей ИНС и, что особенно важно, конкретной ИНС в условиях каждого конкретного полёта можно посредством построения нелинейной модели с помощью одного из эволюционных алгоритмов: метода группового учёта аргументов (МГУА), нейросети, генетических алгоритмов (ГА) [16—18].

Нелинейная модель используется в качестве эталонной модели для обеспечения адекватности модели фильтра Калмана и реального процесса изменения погрешностей ИНС.

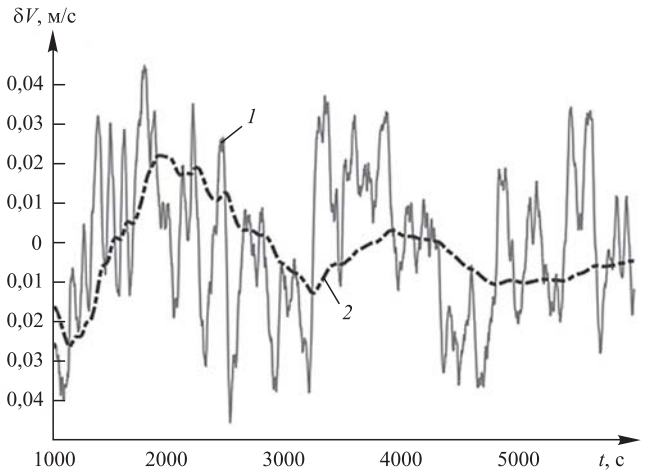
Нелинейная модель используется в качестве эталонной модели для обеспечения адекватности модели фильтра Калмана и реального процесса изменения погрешностей ИНС.

В структуру фильтра Калмана необходимо включить индикатор расходимости процесса оценивания, в качестве которого можно использовать неравенство Рао—Крамера.

В качестве алгоритма модификации фильтра Калмана применяется МГУА. Этот алгоритм использован для построения модели оцениваемого процесса. Если процесс оценивания становится расходящимся, то в фильтре Калмана используется новая модель.

Результаты экспериментальных исследований. Результаты моделирования адаптивных линейного и нелинейного фильтров Калмана представлены на рисунке, где кривая *1* — измерение с реальной ИНС; кривая *2* — оценки с помощью адаптивного линейного фильтра Калмана; кривая *3* — оценки нелинейного фильтра Калмана, модифицированного с помощью МГУА.

По серии экспериментов среднеквадратическое отклонение оценок погрешностей в определении скорости ЛА на интервале времени 350 с в среднем составляет: с помощью



Погрешности ИНС в определении скорости и её оценки

линейного адаптивного фильтра Калмана 0,35 м/с, модифицированного фильтра Калмана 0,1 м/с.

Ошибки ИНС АИСТ-350 в определении скорости ЛА представлены на рисунке.

Оценка вычислительных затрат. Для ориентировочного расчёта вычислительных затрат использован тестовый пример. Программа функционирует в течение 50 с, или 5001 шага (каждое чтение принимается с шагом 0,01 с), рассчитано общее количество циклов — 224 744 224 (при делении на 5001 получилось 44 940 циклов).

Программы «Фильтр Калмана» (ФК), «Адаптивный фильтр Калман»а (АФК), «Нелинейный фильтр Калмана» (НФК) и «Нелинейный адаптивный фильтр Калмана» (НАФК) предназначены для оценки погрешностей ИНС и проведения коррекции на каждом шаге вычислений с обновлением GPS, которое даётся каждую секунду (см. таблицу).

Программы МГУА, «Нейросеть» и ГА предполагают обновление измерительной выборки через каждые 3 с.

Параметры при реализации программ

Вычислительные алгоритмы	Точность коррекции, %	Время выполнения коррекции, с	Время формирования входной выборки данных, с
ФК	65	0,01	0,8
АФК	70	0,01	0,8
НФК	85	0,50	0,8
НАФК	88	0,75	1,5
МГУА	93	1,50	3,0
Нейросеть	94	3,00	3,0
ГА	95	27,5	3,0

На основе приведённых в таблице данных можно получить представление о требуемых вычислительных затратах при реализации алгоритмов коррекции ИНС.

Заключение. Рассмотрены алгоритмы оценивания различного класса точности и проведена приближённая оценка требуемых вычислительных затрат при их реализации. Полученные результаты позволяют на основе анализа точностных характеристик и требуемых мощностей вычислителей принять решение по выбору корректируемых ИНС при проектировании авионики ЛА.

Библиографические ссылки

1. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Минобрнауки России, 2009.

2. **Никулин А.С., Алексеев А.Н., Ангуладзе В.А., Селезнева М.С., Тенюшев Е.Н.** Начальная выставка инерциальных навигационных систем летательных аппаратов корабельного базирования // Прикладная физика и математика. 2018. № 1. С. 59—64.

3. **Селезнева М.С., Клычников В.В., Неусыпин К.А., Хэ Юн.** Исследование перспективных измерительных комплексов летательных аппаратов / В сб.: Достижения вузовской науки: тр. Третьей междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 28—35.

4. **Неусыпин К.А., Селезнева М.С.** Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.

5. **Selezneva M.S., Neusypin K.A.** Development of a measurement complex with intelligent component // Measurement Techniques. 2016. Vol. 59. No. 9. P. 916—922.

6. **Кабакова А.С., Высокова М.С., Чан Н.Х.** Методы коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 2. С. 18.

7. **Чан Н.Х., Селезнева М.С.** Разработка алгоритмов коррекции навигационных систем / В сб.: Актуальные вопросы фундаментальных наук: тр. Междунар. науч. конф. 2014. С. 155—158.

8. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Шэнь К.** Алгоритмические способы коррекции автономных инерциальных навигационных систем / В сб.: Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС—2014): матер. 7-й росс. мультиконф. по проблемам управления. Москва, 2014. С. 637—641.

9. **Shen K., Selezneva M.S., Neusypin K.A., Proletarsky A.V.** Novel variable structure measurement system with intelligent components for flight vehicles // Metrology and Measurement Systems. 2017. Vol. 24. No. 2. P. 347—356.

10. **Shakhtarin B.I., Shen K., Neusypin K.A.** Modification of the nonlinear kalman filter in a correction scheme of aircraft navigation systems // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. Vol. 61. No. 11. P. 1252—1258.

11. **Селезнева М.С., Нгуен Д.Т.** Выбор приоритетной ИНС в составе бортового комплекса для решения целевых задач ЛА / В сб.: Достижения вузовской науки: тр. II междунар. науч.-практ. конф. 2016. С. 127—130.

12. **Ван М., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Селезнева М.С.** Навигационные комплексы беспилотной машины с повышенной управляемостью и наблюдаемостью / В сб.: Российская наука в современном мире: сб. статей XIII междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 55—57.

13. **Шень К., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.

14. **Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Разработка алгоритма

построения моделей для коррекции навигационных систем в автономном режиме // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 8. С. 30—38.

15. **Цибизова Т.Ю., Пьо С., Селезнева М.С.** Математическое моделирование динамических систем с использованием параметрической идентифицируемости // Современные наукоёмкие технологии. 2018. № 1. С. 54—60.

16. **Neusypin K.A., Proletarsky A.V., Shen K., Liu R., Guo R.** Aircraft self-organization algorithm with redundant trend // Nanjing Li Gong Daxue Xuebao. 2014. Vol. 38. No. 5. P. 602—607, 614.

17. **Фам С.Ф., Неусыпин К.А., Селезнева М.С.** Разработка компактного алгоритма самоорганизации / В сб.: Наука сегодня: проблемы и пути решения: матер. Междунар. науч.-практ. конф. В 2 ч. 2016. С. 64—65.

18. **Шашурин В.Д., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Технология формирования акцептора действия навигационного комплекса с использованием динамического системного синтеза // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 3. С. 121—126.

Ссылка для цитирования

Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Шэнь К., Ван Л., Сюетин Ч. Алгоритмы обработки информации инерциальных навигационных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 12. С. 555—563.

УДК 681.511.4

А.П. Преснова

(Московский институт электроники и математики
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»)

presnova.a.p@yandex.ru

ОПТИМАЛЬНОЕ И СУБОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА РАСШИРЕННОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ

Обозначена проблема поиска оптимального управления нелинейными системами. С помощью алгоритмического метода, предложенного в данной работе, построено субоптимальное управление нелинейным объектом. Сделаны необходимые предположения для использования метода расширенной линеаризации. На примере продемонстрирована работа алгоритмического метода синтеза субоптимальных управлений, а также проведено сравнение поведения системы при двух режимах: с оптимальным и субоптимальным управлениями.

Ключевые слова: нелинейные системы; оптимальное управление; уравнение типа Риккати; расширенная линеаризация; уравнение Гамильтона—Якоби—Беллмана.

The problem of searching for optimal control of nonlinear systems is designated. Using the algorithmic method proposed in this paper, suboptimal control of a nonlinear object is constructed. The necessary assumptions for using the method of extended linearization are made. The work of an algorithmic method for synthesizing suboptimal controls is demonstrated on example. Comparison of the behavior of the system in two modes: with optimal and suboptimal controls is carried out.

Keywords: nonlinear systems; optimal control; Riccati-type equation; extended linearization; Hamilton—Jacobi—Bellman equation.

Введение. В настоящее время проблема управления нелинейными объектами является актуальной. Это связано, в первую очередь, с неизбежной востребованностью синтеза оптимальных управляющих воздействий для современных автоматизированных систем, функционирование которых описывается нелинейными дифференциальными уравнениями. Проблема построения оптимального управления нелинейными системами связана с необходимостью отыскания управляющих воздействий в режиме реального времени, когда параметры объекта, внешние условия и другие факторы непрерывно изменяются. В таком случае для вычисления оптимального управления необходимы большие вычислительные мощности. В большинстве случаев для решения этой проблемы возможно построение субоптимального управления. При этом обеспечивается достижение поставленной цели

управления, возможно, с большими затратами на переходные процессы.

В данной работе предложен алгоритмический метод синтеза субоптимальных управлений с использованием метода расширенной линеаризации [1]. Такая линеаризация позволяет представить исходную нелинейную систему в виде системы с линейной структурой, параметры которой зависят от состояния объекта. При этом исходная математическая модель заменяется не приближенной линеаризованной моделью, а эквивалентной моделью. Полученное эквивалентное представление позволит при отыскании управления перейти от решения уравнения Гамильтона—Якоби—Беллмана к уравнению типа Риккати с параметрами, зависящими от состояния объекта [2].

При таком подходе возникают следующие трудности:

представление, полученное с помощью расширенной линеаризации, не является единственным. Из всего множества возможных представлений исходной нелинейной системы в виде системы с линейной структурой, параметры которой зависят от состояния объекта, необходимо выбрать некоторое «оптимальное» представление, которое при этом не нарушает условий управляемости и наблюдаемости полученной системы. Данная проблема является нерешённой;

необходимо решить полученное уравнение типа Риккати с параметрами, зависящими от состояния объекта. В случае многомерных систем это является непростой задачей. Для решения полученного уравнения применяется алгоритмический метод, основанный на использовании необходимых условий оптимальности системы управления.

В работе приведён пример нелинейной системы, для которой построены оптимальное управление и субоптимальное управление с использованием предложенного метода.

Оптимальное управление. Будем рассматривать задачу синтеза оптимальных управляющих воздействий при неограниченном времени окончания переходных процессов для нелинейного управляемого объекта, описываемого в общем виде дифференциальным уравнением

$$\begin{aligned} &\frac{d}{dt}x(t) = f(x(t)) + B(x(t))u(t); \\ &x(t_0) = x_0, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $x(t) \in R^n$ — состояние системы; $x_0 \in X_0$, X_0 — область возможных начальных состояний системы; $u(t) \in R^r$ — управляющее воздействие; n, r_n — размерности множества R; $f(x(t)), B(x(t))$ — действительные и непрерывные матрицы-функции соответствующих размеров.

Введём функционал качества в виде

$$J(x,u) = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty}\{x^{\mathrm{T}}(t)Qx(t) + u^{\mathrm{T}}(t)Ru(t)\}dt. \qquad (2)$$

Здесь матрицы Q и R — положительно определённые, симметрические, т.е. $Q = Q^{\mathrm{T}}, R = R^{\mathrm{T}}$, $Q \succ 0, R \succ 0$. Ограничения на управления учитываются при назначении матрицы R.

Введём в рассмотрение функцию Беллмана, определённую в виде

$$V(s,x(t)) \triangleq \inf_{u(t)}\left[\frac{1}{2}\int_{s}^{t}\{x^{\mathrm{T}}(t)Qx(t) + u^{\mathrm{T}}(t)Ru(t)\}dt\right].$$

Будем считать, что данная функция является дифференцируемой при любых допустимых управлениях. В общем случае значением функции $V(t,x(t))$ является решение задачи динамического программирования, связанное с дифференциальным уравнением первого порядка в частных производных Гамильтона—Якоби—Беллмана [3],

$$V(t,x(t)) = \min_{u} H\left(x(t),u(t),\frac{\partial V(t,x(t))}{\partial x}\right).$$

Здесь H — гамильтониан, является непрерывной функцией и записывается в виде

$$\begin{aligned} &H\left(x(t),u(t),\frac{\partial V(t,x(t))}{\partial x}\right) = \\ &= \frac{1}{2}\{x^{\mathrm{T}}(t)Qx(t) + u^{\mathrm{T}}(t)Ru(t)\} + \\ &+ \frac{\partial V(t,x(t))}{\partial x}\{f(x(t)) + B(x(t))u(t)\}. \end{aligned} \qquad (3)$$

Оптимальное управление для задачи (1), (2) является точкой стационарности гамильтониана и определяется условиями

$$\left\{\frac{\partial H\left(x(t),u(t),\frac{\partial V(t,x(t))}{\partial x}\right)}{\partial u}\right\}^{\mathrm{T}} = 0;$$

$$\frac{\partial^2 H\left(x(t),u(t),\frac{\partial V(t,x(t))}{\partial x}\right)}{\partial u^2} \succ 0.$$

Из первого условия получаем выражение для определения оптимального управления

$$u^0(t) = -R^{-1}B^{\mathrm{T}}(x(t))\left\{\frac{\partial V(x(t))}{\partial x}\right\}^{\mathrm{T}}. \qquad (4)$$

Вектор $\{\partial V(x(t))/\partial x\}^{\mathrm{T}}$ при условии, что рассматривается задача на неограниченном промежутке времени, находится решением уравнения Гамильтона—Якоби—Беллмана:

$$\frac{\partial V(x(t))}{\partial x} f(x(t)) - \frac{1}{2}\frac{\partial V(x(t))}{\partial x} B(x(t)) \times$$
$$\times R^{-1}B^{\mathrm{T}}(x(t))\left\{\frac{\partial V(x(t))}{\partial x}\right\}^{\mathrm{T}} + \frac{1}{2}x^{\mathrm{T}}(t)Qx(t) = 0. \quad (5)$$

Таким образом, проблема синтеза оптимального управления (4) заключается в отыскании решения уравнения (5). Исходная система (1) с оптимальным управлением (4) примет вид

$$\frac{d}{dt}x(t) = f(x(t)) - B(x(t))R^{-1}B^{\mathrm{T}}(x(t))\left\{\frac{\partial V(x(t))}{\partial x}\right\}^{\mathrm{T}};$$
$$x(t_0) = x_0.$$

Метод расширенной линеаризации. Будем искать решение уравнения (5), применив к исходной модели управляемого объекта метод расширенной линеаризации. Для этого сделаем несколько необходимых предположений [4].

Предположение 1. Предположим, что функция $f(x(t))$ — непрерывная, дифференцируемая по x. Предположим, что функции $f(x(t))$, $B(x(t))$ такие, что из любых начальных условий (t_0, x_0), принадлежащих к области допустимых значений, исходит одно и только одно решение уравнения (1).

Предположение 2. Предположим, что при $x = 0_n$ выполняются следующие условия: $f(0) = 0$ и $B(x(t)) \neq 0$ для всех $x(t)$, принадлежащих к области допустимых значений.

При выполнении предположений 1 и 2 можно представить матрицу $f(x(t))$, входящую в исходное уравнение модели объекта (1), в виде

$$f(x(t)) = A(x(t))x(t). \qquad (6)$$

Исходная модель объекта (1) с учётом (6) запишется в виде

$$\frac{d}{dt}x(t) = A(x(t))x(t) + B(x(t))u(t);$$
$$x(t_0) = x_0. \qquad (7)$$

Такое представление исходной нелинейной модели в виде модели с линейной структурой, параметры которой зависят от состояния объекта, в литературе называется SDC-представлением (State Dependent Coefficient). Как отмечалось ранее, такое представление не единственно. Из всех возможных представлений (6) подойдут только те, при которых система (7) будет управляема.

Для поиска решений уравнения Гамильтона—Якоби—Беллмана (5) введем соотношение

$$\left\{\frac{\partial V(x(t))}{\partial x}\right\}^{\mathrm{T}} = S(x(t))x(t).$$

При такой замене уравнение (5) примет вид

$$x^{\mathrm{T}}(t)[S(x(t))A(x(t)) + A^{\mathrm{T}}(x(t))S(x(t)) -$$
$$- S(x(t))B(x(t))R^{-1}B^{\mathrm{T}}(x(t))S(x(t)) + Q]x(t) = 0. \qquad (8)$$

Так как уравнение (8) должно выполняться при любых $x(t_0)$ и $x(t)$, матрица $S(x(t))$ будет находиться из матричного уравнения

$$S(x(t))A(x(t)) + A^{\mathrm{T}}(x(t))S(x(t)) -$$
$$- S(x(t))B(x(t))R^{-1}B^{\mathrm{T}}(x(t))S(x(t)) + Q = 0. \qquad (9)$$

Полученное уравнение (9) в литературе имеет название матричного уравнения Риккати с параметрами, зависящими от состояния объекта. Оптимальное управление будет находиться следующим образом:

$$u(t) = -R^{-1}B^{\mathrm{T}}(x(t))S(x(t))x(t). \qquad (10)$$

Исходная система (1) с полученным оптимальным управлением (10) примет вид

$$\frac{d}{dt}x(t) = f(x(t)) -$$
$$- B(x(t))R^{-1}B^{\mathrm{T}}(x(t))S(x(t))x(t);$$
$$x(t_0) = x_0. \qquad (11)$$

Для того чтобы полученная система была устойчива, матрица $S(x(t))$ должна быть положительно определённой. Доказательство этого утверждения можно найти в работе [5]. В многомерном случае отыскать решение уравнения (9) является нелёгкой задачей.

Отметим, что гамильтониан (3) системы (11) при оптимальном управлении (10) и соответствующей траектории равен нулю. В этом нетрудно убедиться, записав гамильтониан и учитывая (9).

Алгоритмический метод оптимизации системы. Рассмотрим в общем виде метод формирования алгоритмов оптимизации нелинейных систем управления. Данный метод понадобится для отыскания реализуемых решений уравнения (9). Подробно общая схема метода получена и обоснована в работе [4]. Для этого метода в качестве объекта управления рассматривается система, в которой присутствуют параметры, специально предназначенные для парирования внешних возмущений,

$$\frac{d}{dt}x(t) = F(x(t), u(t), \eta(t), \alpha(t));\quad x(t_0) = x_0, \tag{12}$$

где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^r$, $\eta \in R^k$ — вектор параметров объекта, подвергающихся возмущениям; $\alpha \in R^h$ — вектор параметров объекта, выделенных в системе для её оптимизации; в общем случае $k \geqslant h$.

В основу конструкции алгоритмов оптимизации системы управления положено свойство, что поведение гамильтониана при оптимальном управлении $u^0(t)$ и соответствующей траектории $x^0(t)$ изменяется в течение переходного процесса по вполне определённой траектории [6].

Запишем необходимые условия минимума функционала качества, выраженные в поведении гамильтониана на оптимальной траектории. Пусть $\varphi(t)$ — значение гамильтониана в каждый момент времени при отсутствии параметрических возмущений (или при полном их парировании) при оптимальном управлении и соответствующей траектории системы. Таким образом, $H^0(t) = H(t, x^0(t), u^0(t), \lambda^0(t)) = \varphi(t)$. Введем скалярную функцию $\Re(t)$ такую, что

$$\Re^0(t) = H^0(t) - \varphi(t) = 0. \tag{13}$$

В основу предлагаемой конструкции алгоритмов оптимизации положим необходимые и достаточные условия оптимальности (13). Очевидно, что если $\alpha(t) \neq \eta(t)$, то равенство (13) выполняться не будет, т. е. $\Re(t) = H(t) - \varphi(t) \neq 0$; здесь уже гамильтониан имеет вид $H(t) = H(t, x(t), u(t), \lambda(t), \eta(t), \alpha(t))$. Вводя в рассмотрение функцию Ляпунова вида

$$V_L(\eta(t), \alpha(t)) = \frac{1}{2}\{\Re(t) - \Re^0(t)\}^2 = \frac{1}{2}\{\Re(t)\}^2,$$

учитывая, что $\frac{\partial H(t)}{\partial t} = \frac{\partial H^0(t)}{\partial t}$, $\frac{\partial \varphi(t)}{\partial \eta} = 0$, $\frac{\partial \varphi(t)}{\partial \alpha} = 0$, из условия

$$\frac{d}{dt}V_L(\eta(t), \alpha(t) = = \Re(t)\left\{\frac{\partial H(t)}{\partial \eta}\frac{d\eta(t)}{dt} + \frac{\partial H(t)}{\partial \alpha}\frac{d\alpha(t)}{dt}\right\} \leqslant 0$$

алгоритм параметрической оптимизации назначим в виде

$$\frac{d}{dt}\alpha(t) = -\left\{\frac{\partial H(t, x(t), u(t), \lambda(t), \eta(t), \alpha(t))}{\partial \alpha}\right\}^{\mathrm{T}} \Re(t);\quad \alpha(t_0) = \alpha_0. \tag{14}$$

При этом параметрическая оптимизация будет успешной, если будет выполняться неравенство

$$\Re^2(t)\left\|\frac{\partial H(t, x(t), u(t), \lambda(t), \eta(t), \alpha(t))}{\partial \alpha}\right\|^2 > \left|\Re(t)\frac{\partial H(t, x(t), u(t), \lambda(t), \eta(t), \alpha(t))}{\partial \eta}\frac{d\eta(t)}{dt}\right|. \tag{15}$$

Выполнение условия (15) обеспечивает асимптотические свойства процессу параметрической оптимизации объекта вида (12).

Отметим, что в случае $h < k$ значение гамильтониана в каждый момент времени при наличии возмущений, т. е. при $\eta(t) \neq 0_k$, при оптимальных (соответствующих действующим возмущениям) значениях параметров $\alpha^0(t) \neq 0_h$ в каждый момент времени будет принимать значение, отличное от $\varphi(t)$. Этот случай в работе не рассмотрен и требует дальнейших исследований.

Синтез субоптимального управления с использованием алгоритмического метода. Синтез оптимального управления наталкивается на трудности, связанные с решением уравнения Риккати (9) с параметрами, зависящими от состояния объекта, в темпе функционирования системы. Поэтому для поиска матрицы $S(x(t))$ привлечём алгоритмический метод, который позволит синтезировать субоптимальное управление. Для этого представим матрицу $S(x(t))$ в виде

$$S(x(t)) = S_0 + s(t).$$

Матрица S_0 находится из уравнения (9) при постоянных параметрах при $x(t_0) = x_0$:

$$S(x_0)A(x_0) + A^{\text{т}}(x_0)S(x_0) - \\ - S(x_0)B(x_0)R^{-1}B^{\text{т}}(x_0)S(x_0) + Q = 0, \quad (16)$$

а матрица $s(t)$ отыскивается с использованием алгоритма параметрической оптимизации (14):

$$\frac{d}{dt}s(t) = \\ = -\left\{\frac{\partial H(x(t),u(t),[S_0 + s(t)]x(t))}{\partial s}\right\}^{\text{т}} \Re(t); \\ s(t_0) = 0. \quad (17)$$

В данном случае, учитывая (13) и то, что гамильтониан на оптимальной траектории равен нулю, получим $\Re(t)$ в виде

$$\Re(t) = H(x(t),u(t),[S_0 + s(t)]x(t)).$$

Учитывая, что при $S(x(t)) = S_0 + s(t)$ гамильтониан имеет вид (с учётом (10))

$$H(x(t),u(t),[S_0 + s(t)]x(t)) = \frac{1}{2}x^{\text{т}}(t)\times \\ \times\{Q - [S_0 + s(t)]B(x)R^{-1}B^{\text{т}}(x)[S_0 + s(t)] + \\ + [S_0 + s(t)]A(x) + A^{\text{т}}(x)[S_0 + s(t)]\}x(t), \quad (18)$$

можно найти

$$\left\{\frac{\partial H(x(t),u(t),[S_0 + s(t)]x(t))}{\partial s}\right\}^{\text{т}} = \\ = [-B(x(t))R^{-1}B^{\text{т}}(x(t))(S_0 + s(t)) + \\ + A^{\text{т}}(x(t))]x(t)x^{\text{т}}(t). \quad (19)$$

В итоге получаем алгоритм в виде

$$\frac{d}{dt}s(t) = -\left\{\frac{\partial H\left(x(t),u(t),[S_0 + s(t)]x(t)\right)}{\partial s}\right\}^{\text{т}} \times \\ \times H(x(t),u(t),[S_0 + s(t)]x(t)); \\ s(t_0) = 0, \quad (20)$$

где первый множитель находится с помощью уравнения (19), а второй множитель — гамильтониан (18).

Управление с параметрической оптимизацией принимает вид

$$u^*(t) = -R^{-1}B^{\text{т}}(x^*(t))[S_0 + s(t)]x^*(t), \quad (21)$$

а система (1) с управлением (21) принимает вид

$$\frac{d}{dt}x^*(t) = f(x^*(t)) - \\ - B(x^*(t))R^{-1}B^{\text{т}}(x^*(t))[S_0 + s(t)]x^*(t); \\ x^*(t_0) = x_0, \quad (22)$$

где матрица S_0 определяется уравнением (16), а $s(t)$ находится с помощью алгоритма (20).

Таким образом мы получаем реализуемый алгоритм оптимизации нелинейной системы.

В общем случае оптимальное управление (10) не равно управлению (21), найденному с использованием алгоритма оптимизации, до тех пор пока не будет выполняться условие $S(x(t)) = S_0 + s(t)$. Поэтому управление (21) является субоптимальным управлением. При таком управлении перестройка системы (22) будет происходить по другой траектории, отличной от оптимальной траектории (11), т. е.

$$x(t) - x^*(t) \neq 0.$$

Полученное с помощью предложенного алгоритма управление является неоптимальным и, следовательно, более затратным. Так, если функционал качества для оптимальной системы

$$J(x,u) = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty}\{x^{\text{т}}(t)Qx(t) + \\ + x^{\text{т}}(t)S^{\text{т}}(x)B(x)R^{-1}B^{\text{т}}(x)S(x)x(t)\}dt,$$

то для системы (22) функционал качества примет вид

$$J(x^*,u^*) = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty}\{x^{*\text{т}}(t)Qx^*(t) + x^{*\text{т}}(t)[S_0 + s(t)]^{\text{т}}\times \\ \times B(x^*)R^{-1}B^{\text{т}}(x^*)[S_0 + s(t)]x^*(t)\}dt,$$

при этом выполняется неравенство

$$J(x,u) < J(x^*,u^*).$$

Пример. Рассмотрим конкретный пример нелинейной системы управления, для которой построим оптимальное управление, а также с помощью предложенного алгоритмического метода и с использованием расширенной линеаризации построим субоптимальное управ-

ление. Пусть нелинейная система первого порядка имеет вид

$$\frac{d}{dt}x(t) = x^2(t) + u(t); \quad x(t_0) = 1. \tag{23}$$

Назначим матрицы штрафа: $R = 1$, $Q = 3$. В соответствии с представлением (7), для данной задачи будем однозначно иметь матрицы $A(x)$ и $B(x)$ в виде $A(x) = x$; $B(x) = 1$.

1. Оптимальное управление (10) в данном случае будет находиться в виде

$$u(t) = -S(x)x(t),$$

где матрица $S(x)$ находится из уравнения Риккати (9).

При условии, что матрица $S(x)$ положительно определённая, получим

$$S(x) = x(t) + \sqrt{x^2(t) + 3},$$

оптимальная траектория системы (23) будет описываться уравнением

$$\frac{d}{dt}x(t) = -x(t)\sqrt{x^2(t) + 3}. \tag{24}$$

2. Субоптимальное управление будем искать в виде (21), используя алгоритм (20). Для этого построим гамильтониан:

$$H(x(t), u(t), [S_0 + s(t)]x(t)) = \\ = \frac{3}{2}x^2(t) - \frac{1}{2}[S_0 + s(t)]^2 x^2(t) + [S_0 + s(t)]x^3(t).$$

В данной задаче алгоритм (20) примет вид

$$\frac{d}{dt}s(t) = -\{x^3(t) - x^2(t)[S_0 + s(t)]\}\times \\ \times\left(\frac{3}{2}x^2(t) - \frac{1}{2}[S_0 + s(t)]^2 x^2(t) + [S_0 + s(t)]x^3(t)\right),$$

а матрица $S_0 = 3$ легко находится из решения уравнения (16) при данных условиях. Уравнение, описывающее субоптимальную траекторию системы при данном управлении, примет вид

$$\frac{d}{dt}x(t) = x^2(t) - 3x(t) - s(t)x(t). \tag{25}$$

Компьютерное моделирование полученных систем управления (24) и (25) проводили в пакете MATLAB Simulink. На рис. 1 показаны траектории системы при различных управлениях. При субоптимальном управлении, полученном с использованием алгоритмов параметрической оптимизации, рассматриваемых в данной работе, траектория системы лежит ниже оптимальной траектории, т. е. переходные процессы в системе идут быстрее. Таким образом, предложенный алгоритм поиска субоптимальных управлений обеспечивает бóльшую скорость процессов оптимизации системы за счёт бóльших затрат, чем при оптимальном управлении.

На оптимальной траектории функционал качества должен принимать минимальное значение, а гамильтониан равняться нулю. В случае неоптимальной траектории функционал качества будет принимать значение большее, чем в оптимальном случае, что и подтверждается моделированием (рис. 2). Гамильтониан системы становится равным нулю, когда система оптимизируется (рис. 3).

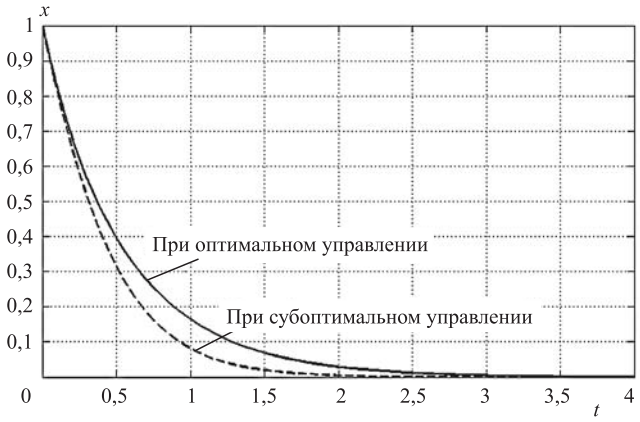


Рис. 1. Траектории системы при различных управляющих воздействиях

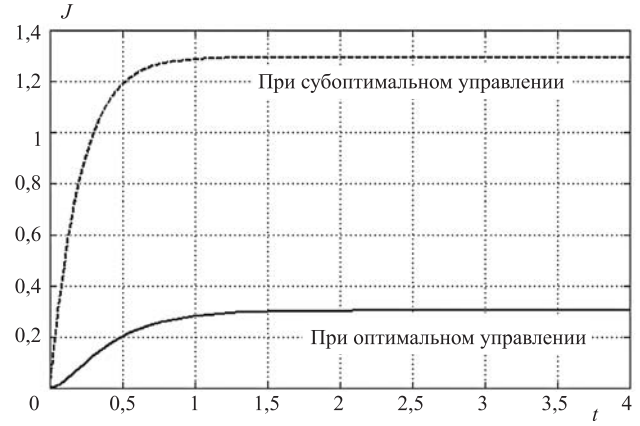


Рис. 2. Значения функционала качества при различных траекториях системы

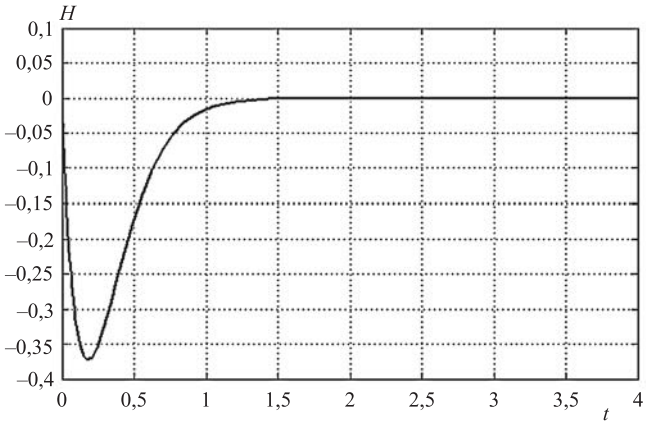


Рис. 3. Поведение гамильтониана при субоптимальном управлении

Заключение. Результаты моделирования демонстрируют успешную работу алгоритма параметрической оптимизации, при помощи которого система асимптотически переходит к заданному состоянию. Построенный алгоритм поиска субоптимальных управлений является более затратным, менее экономичным, чем при оптимальных управлениях, но обеспечивает бóльшую скорость переходных процессов. Данное свойство полученного алгоритма может использоваться как преимущество. Работая в дальнейшем в этом направлении, следует сделать данный алгоритм настраиваемым на получение желаемых значений функционала качества, допустимых в каждом конкретном случае, обеспечивая необходимую скорость процессов оптимизации.

Библиографические ссылки

1. **Pearson J.D.** Approximation methods in optimal control // J. of Electronics and Control. 1962. Vol. 12. P. 453—469.

2. **Cimen T.D.** State-Dependent Riccati Equation (SDRE) Control: A Survey // Proc. 17th World Conf. IFAC, Seoul, Korea, July 6—11. 2008. P. 3771—3775.

3. **Беллман Р., Энджел Э**. Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.: Мир, 1974. 207 с.

4. **Афанасьев В.Н., Преснова А.П.** Формирование алгоритмов оптимизации нестационарных систем управления на основе необходимых условий оптимальности // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2018. № 3. С. 153—159.

5. **Афанасьев В.Н.** Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами. М.: Ленард, 2015. 224 с.

6. **Атанс М., Фалб П.** Оптимальное управление / под ред. Ю.И. Топчеева. М.: Машиностроение, 1968. 764 с.

Ссылка для цитирования

Преснова А.П. Оптимальное и субоптимальное управление нелинейным объектом с использованием метода расширенной линеаризации // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 12. С. 563—569.

Требования по оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003 и ГОСТ Р 7.0.5—2008 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No, том — Vol., страницы — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом http.//translit.ru/.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Моделирование процесса циклоидального формообразования многогранников в бироторных механических системах. *Вестник машиностроения.* 2018. № 8.

Изложен метод решения модели циклоидального формообразования многогранников, основанный на приведении её уравнений к алгебраическому виду полиноминальной аппроксимацией трансцендентных функций.

Повышение эффективности технической подготовки производства в многономенклатурном машиностроении. *Вестник машиностроения.* 2018. № 8.

Рассмотрен комплексный подход при решении задачи повышения конкурентоспособности продукции многономенклатурного машиностроительного производства. Доказано, что основной задачей машиностроительных производств является сокращение сроков вывода на рынок наукоёмкой продукции надлежащего качества. Показано соответствие этапов жизненного цикла изделия и технической подготовки производства. Даны конкретные рекомендации по обеспечению надлежащего качества продукции.

Повышение качества и производительности операции сварки вала трубы и винтовой спирали шнеков для буровых установок. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2018. Т. 16. № 8.

Описаны конструкция и состав роботизированного технологического комплекса приварки к трубе шнековой полосы сваркой в среде защитных газов (MAG), ход экспериментальных работ по повышению качества сварного шва, увеличению скорости сварки и снижению расходов на защитный газ путём замены углекислого газа сварочной смесью «Коргон».

Применение прокатно-волочильного стана в производстве изделий для электромашиностроения. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2018. Т. 16. № 8.

Совмещением в одном агрегате — прокатно-волочильном стане — двух холодных процессов обработки металлов давлением — прокатки в клети дуо 350 катанки и непрерывно-литой заготовки и волочения со скольжением плющеной полосы в пятибарабанном волочильном блоке с диаметром барабанов 800 мм организовано производство промышленных партий изделий электротехнического назначения: шин прямоугольного сечения, коллекторных полос клиновидного профиля, контактного провода для городского электротранспорта. Стан отвечает основным требованиям, предъявляемым к гибким переналаживаемым системам, в условиях частой сменяемости сортамента, выпускаемого малообъёмными партиями.

Квантово-механическое моделирование энергии адгезии наноструктурных покрытий с режущим инструментом и с обрабатываемым материалом. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2018. Т. 14. № 8.

Проведена оценка энергии адгезии износостойких покрытий на твёрдосплавном инструменте и энергии адгезии покрытий с обрабатываемым материалом. Определены эффективные составы покрытий, обеспечивающие их удержание на инструменте при резании.

Повышение работоспособности клапана двигателей внутреннего сгорания методом ионно-плазменного нанесения наноструктурного покрытия (TiAlSi)N. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2018. Т. 14. № 8.

Рассмотрена технология нанесения наноструктурного ионно-плазменного покрытия (TiAlSi)N на ножку клапана двигателя внутреннего сгорания. Проведено исследование структуры, механических и триботехнических свойств данного покрытия. После сравнительного анализа с покрытием TiN предложены оптимальные технологические параметры для нанесения наноструктурного покрытия (TiAlSi)N.

Оценка влияния смазочных материалов на ресурс червячных передач по критерию предельного износа. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2018. Т. 19. № 8.

Представлен обзор различных методов оценки интенсивности изнашивания. Проведена оценка влияния смазочных материалов на ресурс червячных передач по критерию предельного износа на основе метода сравнительных износных испытаний. Предложен метод оценки интенсивности изнашивания, учитывающий влияние пленкообразующих смазочных материалов.

Применение общей процедуры параметрического и силового гашения фрикционных колебаний в системах с нелинейными силами. *Сборка в машиностроении, приборостроении.* 2018. Т. 19. № 8.

Рассмотрена общая процедура параметрического или силового воздействия при гашении автоколебаний в системах с нелинейными силами. Она может использоваться для разработки и проектирования активных автоколебательных систем. Введение активного виброгасящего параметрического или силового воздействия обеспечивает снижение амплитуды колебаний. Частота параметрического или силового возмущения в этой процедуре в случае необходимости может отличаться от частоты колебаний собственно механизма. Приведены расчёты для параметрического и силового гашения колебаний, подтверждающие эффективность процедуры.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «АВТОМАТИЗАЦИЯ. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» В 2018 г.

№ журнала Стр.

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Абдулов Р.Н., Аббасзаде Ф.Г., Меджидова С.А. Оптимальный контроль режима работы аэрозольного генератора для преграждения прохождения оптического излучения 7 314

Акулинин Е.И., Ишин А.А., Скворцов С.А., Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И. Автоматизация процесса адсорбционного разделения газовой смеси и получения водорода 4 150

Амелькина С.А., Амелькин Э.А., Дупленкова К.А., Микаева С.А. Проект освещения квартала г. Саранск светодиодными светильниками. 6 265

Амелькина С.А., Амелькин Э.А., Микаева С.А. Современные проблемы светодиодного освещения 5 212

Асадов Х.Г., Джахидзаде Ш.Н., Абдулов Р.Н. Метод многоступенчатой оптимизации сложных систем, характеризуемых множеством многокритериально оптимизируемых процессов 11 489

Ашрятов А.А., Вишневский С.А., Микаева С.А. Методика расчёта колориметрических характеристик световых приборов с изменяемым спектром излучения 3 108

Бобырь М.В. Интеллектуальная система управления оборудованием с ЧПУ 7 301

Божков А.И., Ковалёв Д.А., Дёгтев С.С. Роль человека в процессе управления качеством продукции 8 339

Бойчук М.И., Микаева С.А. Сборка термокомпенсированных кварцевых генераторов. 2 56

Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Сусский А.В. Разработка информационно-измерительного канала мониторинга процесса низкотемпературного плазменного упрочнения 12 546

Горбунов А.А., Балакин А.В., Микаева С.А. Исследование характеристик специальных люминесцентных ламп для подсветки аквариумов в сравнении с традиционными люминесцентными лампами 12 553

Горбунов А.А., Балакин А.В., Микаева С.А. Исследование условий и степени развития экосистемы аквариума при освещении специальными люминесцентными лампами 11 502

Горбунов А.А., Микаева А.С., Микаева С.А. Исследования по повышению качества и экологичности люминесцентных ламп 7 317

Григорьев-Фридман С.Н. Мобильное переговорное устройство на базе твёрдотельного лазера с накачкой лазерным диодом 5 216

Даев Ж.А., Султанов Н.З. Модель автоматической системы контроля и прогнозирования загрязнения магистрального газопровода на основе нечёткой логики. 11 495

Денисов М.С., Коростелев В.Ф. Управление процессом обработки жидкого металла давлением с помощью адаптивной системы с эталонной моделью 4 156

Долгов В.А., Подкидышев А.А., Дацюк И.В., Кабанов А.А., Васильцов М.А. Семантические модели технологических систем для имитационного моделирования производственных процессов 8 350

Дьяков И.Ф. Применение нейронной технологии для прогнозирования надёжности транспортного средства 2 67

Дьяконов А.А., Городкова А.Е., Шульгин А.Н. Автоматизированная программа для оптимизации работы группы инструментального хозяйства 8 346

Дьяконов А.А., Городкова А.Е., Шульгин А.Н. Зависимость качественных и количественных показателей обработки отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита от схемы заточки режущего инструмента 9 409

Ерохин В.В. Оптимальное управление технологическим процессом на базе станка с ЧПУ . . . 6 260

Житников В.П., Шерыхалина Н.М., Соколова А.А. Численное исследование влияния непостоянства электродных потенциалов на результаты электрохимической обработки 10 448

Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В. Интеллектуальное управление гибридной технологией, включающей 3D-печать и механическую обработку на станках с ЧПУ в условиях цифровых производств 9 397

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М., Колчин П.В. Управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств на основе искусственного интеллекта и облачных технологий 6 252

Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г., Берсенева Н.И. Адаптивное управление составом формалина при его производстве 11 492

Куликов И.Н., Колесник Л.Л. Исследование влияния компоновки модулей многокластерного технологического комплекса на общую производительность установки с использованием имитационного моделирования 12 542

Курицына В.В., Силуянова М.В., Сильченко О.Б. Автоматизация процедур технологической экспертизы в принятии производственных решений 5 199

Ларченко Ю.В., Суборев К.Г., Филипчик А.В., Филипчик В.И., Коваленко М.Н. Предельное быстродействие сканирующих систем на основе оптических гальванометров 5 195

Мирошникова В.Д., Шугалов А.В., Мирошникова Т.Д. Построение структурно-компоновочных решений гибких производственных систем на основе АТНС «Вертикаль» 6 243

Мончарж Э.М., Песков Н.П. Системная автоматизация процесса ректификационного разделения смеси этаноламинов 12 536

Мурзагулов Д.А., Замятин А.В. Адаптивные алгоритмы машинного обучения в управлении технологическими процессами 8 354

Мустафаев М.Г. Анализ эффективности функционирования и управления производственной системой предприятия 11 499

Ничков А.В. Влияние различных факторов на конструктивные параметры червячной модульной фрезы 1 3

Нурушев Е.Т., Хисматуллин Р.М., Даев Ж.А. Проблемы и решение задач авиаремонтного завода в условиях неопределённости состояния объектов ремонта 1 7

Поршнев С.В., Пономарева О.А., Бородин А.М., Мирвода С.Г. Автоматизированная система выпуска металлургической продукции: от разнородных баз данных к созданию единого хранилища данных 10 435

Пустозеров Р.В., Юрьева Р.А., Анисимов И.В., Тулькова И.А. Описание метода определения осевой жёсткости деталей роликовых винтовых передач 12 550

Сабанчин В.Р., Тугов В.В. Управление процессом обжига керамического кирпича с применением многомерного чёткого логического регулятора с интервальной неопределённостью 10 441

Скворцов О.Б. Анализ вибрационных сигналов при решении задач балансировки роторов. . . 2 60

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С. Увеличение жизненного цикла изделий при обработке деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования. 9 403

Тащиян Г.О., Боярова Ю.С. Автоматизированный мониторинг конкурентоспособности инженерных решений предприятия на основе имиджа 3 99

Федорина Е.В., Дьяков И.Ф. Автоматизированное проектирование ресурсосберегающих технологий раскроя металлопроката в условиях холодноштамповочного производства. 7 307

Хусаинова Г.Я. Нестационарная фильтрация вязкопластичной жидкости в пласте. 4 147

Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-М: моделирование типовых конструкций блоков электроники на механические воздействия 9 387

Шалумов А.С., Соловьев Д.Б., Шалумов М.А. АСОНИКА-М-шкаф: моделирование типовых конструкций шкафов и стоек электроники на механические воздействия 11 483

Шалумов А.С., Чабриков С.В., Шалумов М.А. АСОНИКА-Т: анализ и обеспечение тепловых характеристик конструкций аппаратуры 7 291

Шалумов М.А. Проблемы и задачи автоматизированной оценки экстремальных электрических режимов работы электрорадиоизделий 1 10

Шалумов М.А., Шалумов А.С. Исследование особенностей оценки электрических режимов полупроводниковых приборов в схемах микроэлектронной аппаратуры 3 103

Шалумов М.А., Шалумова Н.А. Исследование характера и предпосылок возникновения нарушений электрических режимов полупроводниковых приборов в схемах микроэлектронной аппаратуры 2 51

Шамаев А.Е., Сердобинцев С.П., Шамаев Е.П. Расчётная схема энергоэффективной системы охлаждения газа 10 444

Шашурин В.Д., Селезнева М.С., Клычников В.В., Лукьянова Н.В., Неусыпин К.А., Дьяченко И.Л. Анализ погрешностей проведения измерений конструкций судов 12 531

Янишевская А.Г., Дьяконов Н.В. Модель сферической винтовой площадки для обслуживания внутренней поверхности сферических резервуаров 5 207

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Алесин В.С., Губский В.В., Дружинин О.В., Ерёмин В.Ю., Павленко О.В. Исследования интерференции толкающего винтокольцевого движителя с фюзеляжем летательного аппарата 2 91

Андреев Г.Т., Ершов А.А., Павленко О.В. Комплексный подход к уменьшению шарнирных моментов органов управления летательных аппаратов 5 227

Анисимов И.Ю., Затонский А.В. Управление микроклиматом в здании на основе нечёткой логики. 1 36

Бюшгенс А.Г., Дружинин О.В., Карлин В.С., Корнушенко А.В., Кудрявцев О.В., Павленко О.В. Численные и экспериментальные исследования влияния поворота мотогондол, установленных на конце крыла, на аэродинамические характеристики летательного аппарата 6 273

Габитова Г.Ф. Нейросетевой метод кластерного анализа и группирования тел вращения 8 362

Горбунов А.А., Чепасов В.И., Припадчев А.Д. Идентификация базовых параметров крыла магистрального воздушного судна на этапе эскизного проектирования 2 77

Железникова О.Е., Прытков С.В., Вилков Е.А., Микаева С.А. К вопросу выбора оптимального метода расчёта коррелированной цветовой температуры 1 32

Иванова Г.С., Головков А.А., Олейник Д.С. Формирование набора данных для обучения системы увеличения резкости фотоизображений 10 461

Исаев С.А., Детков А.Н., Безуглов А.А. Цифро-натурный метод оценки характеристик метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны 3 116

Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Шэнь К., Лу В., Сюетин Ч. Алгоритмы обработки информации инерциальных навигационных систем 12 555

Лихоеденко К.П., Ревуцкий С.Д., Серегин Г.М., Сучков В.Б., Каракулин Ю.В. Современные технологии автоматизированного проектирования сверхвысокочастотных устройств 11 510

Микрин Е.А., Комаров М.В., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н. Ленточные критерии стабилизируемости и детектируемости многомерной динамической системы 4 162

Микрин Е.А., Комаров М.В., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Борисенко Н.Ю. Ковариационное управление стабилизацией программной траектории облёта при сближении космических аппаратов 6 268

Моногаров О.И. Разработка интеллектуального метода селекции сигналов частичных разрядов на основе анализа последовательности экстремумов 3 112

Мышляев Ю.И., Нгуен Ти Тхань, Финошин А.В. Непрямое адаптивное управление каскадными системами с интегральным виртуальным алгоритмом 9 421

Неусыпин К.А., Лифей Чжан, Цяоцу Ху, Кай Шэнь. Исследование точности оценивания погрешностей инерциальной навигационной системы при вертикальном перемещении летательного аппарата 11 517

Неусыпин К.А., Лукьянов В.В., Нгуен Динь Тхай. Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме 1 28

Неусыпин К.А., Селезнева М.С., Кай Шэнь, Пьо Си Тху. Разработка численного критерия степени идентифицируемости параметров нелинейной модели атмосферных летательных аппаратов 5 223

Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Евсюков А.А. Разработка проблемно-ориентированной инфраструктуры имитационного моделирования 7 320

Обычайко Д.С., Шихин В.А. Методика формализации киберфизических систем в задачах анализа надёжности. 9 414

Павленко О.В., Пигусов Е.А. Численное исследование особенностей обтекания отсека крыла с системой тангенциального выдува струи на закрылок 4 166

Парфёнов Н.М., Кузин А.В. Исследование физико-механических свойств преобразователей датчиков давления 2 86

Преснова А.П. Оптимальное и субоптимальное управление нелинейным объектом с использованием метода расширенной линеаризации 12 563

Пролетарский А.В., Сюзев В.В., Гуренко В.В., Бычков Б.И. Алгоритмы преобразования спектров в базисах Хартли и Уолша 10 453

Рябцев В.Г., Евдокимов А.П., Меликов А.В. Методология построения интегрированной системы для верификации моделей микросхем полупроводниковой памяти 4 172

Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Разработка акцептора действия измерительного комплекса с использованием концепции динамического системного синтеза 2 73

Сиддиков И.Х., Жукова Ю.А. Имитационное моделирование системы управления динамическим объектом на основе синергетического подхода 1 25

Толкачёв П.А., Шахтарин Б.И. Модель расчёта шумов в синтезаторах частоты 3 127

Шахтарин Б.И., Асланов Г.К., Асланов Т.Г. Определение координат очага землетрясения с использованием фигур второго порядка — эллипса и гиперболы 11 505

Шахтарин Б.И., Сизых В.В., Шевцев В.А. Исследование статистических характеристик фазовой автоподстройки частоты второго порядка методом численного решения уравнения ФПК . . . 1 14

Шашурин В.Д., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Технология формирования акцептора действия навигационного комплекса с использованием динамического системного синтеза 3 121

Шашурин В.Д., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка динамической экспертной системы для беспилотного летательного аппарата 8 366

Шибанов Г.П. Автоматизация процесса кодирования и распознавания графической документации. 6 280

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Долгов В.А., Кабанов А.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия. 4 178

Комаров М.М., Дормидонтова Е.А. Качество предоставления услуг для пользователей в сетях нового поколения 8 377

Мешков Н.А., Лукьянова Н.В., Шашурин В.Д., Суркова А.Д. Применение подхода самоорганизации при решении задачи прогнозирования в интеллектуальной системе управления инновационным развитием социально-экономических систем 10 474

Мирзаханов В.Э. Краткий обзор современных средств DATA MINING 7 330

Поршнев С.В., Корелин И.А. Математическое моделирование информационных контрольно-пропускных систем, обоснование выбора аппроксимации интенсивности поступления заявок . . 7 324

Фокин С.В. Оценка эффективности визуализации информации в системах мониторинга. . . . 3 132

Ханахмедова С.А., Нуруллаев Ш.Р. Управление программируемыми логическими контроллерами ПВХ-миксера. 8 374

Шахнов В.А., Зинченко Л.А., Резчикова Е.В., Макарчук В.В., Сорокин Б.С. К проблеме моделирования динамических систем в наноинженерии 11 523

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А. Разработка алгоритмов управления для коррекции инерциальных навигационных систем летательного аппарата 4 185

Глазков В.В., Микаэльян С.В., Муратов И.В. Цифровая модель дискриминационной характеристики оптико-электронной следящей системы 3 138

Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов 9 428

Николаев С.В. Оценка возможностей авиационных комплексов в ближнем воздушном бою . . 1 41

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тимофеева М.С., Семенов В.Н. Компьютерное тестирование как инструмент оценки уровня сформированности пула компетенции обучающихся 5 232

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 1, 3, 6, 8, 11, 12

Указатель статей, опубликованных в журнале «Автоматизация. Современные технологии» в 2018 г. 12 571

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу «Пресса России» — 27838) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 27.09.2018.
Подписано в печать 22.11.2018.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Канцлер»
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Автоматизация. Современные технологии» обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель