Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 72

4
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.: (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

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

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

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

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

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

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

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

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

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 72 4 / 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 University, 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 N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Putilov V.N. – LLC «Publishing Innovative mashine 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. Inst., Poland

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

Editorial address:
107076 Moscow Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel: (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. FS77-78102), 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

Khusainova G.Ya. Unsteady filtration of viscoplastic fluid in a reservoir 147

Akulinin E.I., Ishin A.A., Skvortsov S.A., Dvoretskiy D.S., Dvoretskiy S.I. Automation of the gas mixture adsorption separation process and production of hydrogen 150

Denisov M.S., Korostelev V.F. The control of the liquid metal treatment process by pressure using an adaptive system with a reference model 156

MODERN TECHNOLOGIES

Mikrin E.A., Komarov M.V., Zubov N.E., Ryabchenko V.N. Banded criteria for the stability and detectability of a multidimensional dynamical system 162

Pavlenko O.V., Pigusov E.A. The features numerical investigation of the flow around the wing compartment with the system of the jet tangential blowing onto the wing flap 166

Ryabtsev V.G., Evdokimov A.P., Melikov A.V. Methodology of the integrated system constructing for verification of semiconductor memory chip models 172

INFORMATION TECHNOLOGIES

Dolgov V.A., Kabanov A.A. The main approaches to the information model formation for the production and technological system of a machine building enterprise 178

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Afanasev V.N., Neusypin K.A. Development of control algorithms for the correction of aircraft inertial navigation systems 185

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

УДК 532.5

Г.Я. Хусаинова, канд. физ.-мат. наук, доц.
(Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)
gkama@mail.ru

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛАСТЕ

Рассмотрена нестационарная фильтрация вязкопластичной жидкости для прямолинейно-параллельной задачи. Получены аналитические решения, описывающие распределения давления и температуры в добывающей галерее. Исследовано влияние начального градиента давления при фильтрации нефти на температурное поле в пласте. Показано, что с ростом значения начального градиента давления и вязкости жидкости тепловой эффект увеличивается.

Ключевые слова: фильтрация; вязкопластичная жидкость; начальный градиент давления; давление; температурное поле; добывающая галерея; уравнение теплопроводности.

The unsteady filtration of a viscoplastic fluid for a rectilinear-parallel task is considered. Analytic solutions that describe the pressure and temperature distributions in the mining gallery are received. The effect of the initial pressure gradient at oil filtration on the temperature field in the formation is investigated. It is shown that the thermal effect increases with increasing initial pressure gradient and fluid viscosity.

Keywords: filtration; viscoplastic fluid; initial pressure gradient; pressure; temperature field; mining gallery; heat conduction equation.

Введение. Для контроля и управления современными технологическими процессами часто необходимо моделировать движение структурированной многокомпонентной жидкости.

Особенности строения неньютоновских жидкостей и существование различных форм их молекулярной подвижности приводят к появлению различных релаксационных процессов. Незнание законов релаксации таких жидкостей может привести к нежелательным эффектам при разработке новых технологических процессов. Развитие теории фильтрации неньютоновских жидкостей в пласте неразрывно связано с техническими приложениями, в первую очередь с задачами гидротехники и теории разработки нефтяных и газовых месторождений.

Наличие начального градиента давления при фильтрации нефти существенно влияет на поля давления, температуры и, наконец, на нефтеотдачу [1]. Поэтому представляют интерес изучение проявления начального градиента давления в различных условиях и количественная оценка его влияния на поля давления и температуры. Построение математических моделей и получение аналитических решений могут способствовать лучшему пониманию исследуемых процессов и на их основе более качественному контролю состояния пласта [2].

Постановка задачи. Ниже моделируется нестационарное течение упругой вязкопластичной жидкости. Особенностью решения задачи о фильтрации аномальной жидкости в пласте является образование переменной области фильтрации, на границе которой модуль градиента давления должен равняться предельному градиенту, а давление — пластовому [3].

Для однотемпературного приближения уравнение энергии имеет вид [4]

$$c_s \frac{\partial T}{\partial t} - c_l m \eta \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad \left|\frac{\partial P}{\partial x}\right| \leqslant G_0; \qquad (1)$$

$$c_s \frac{\partial T}{\partial t} + c_l \upsilon \left(\frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial P}{\partial x} - \eta G_0 \frac{\partial P}{\partial x} \Big/ \left|\frac{\partial P}{\partial x}\right| \right) -$$

$$- c_l \eta m \frac{\partial P}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad \left|\frac{\partial P}{\partial x}\right| > G_0,$$

где T — температура пласта; t — время; c_s, c_l — теплоёмкости скелета и жидкости соответственно; m — коэффициент пористости; η — коэффициент адиабатического охлаждения; P — давление жидкости в пласте; λ — теплопроводность; x — координата; G_0 — начальный (предельный) градиент давления; υ — скорость фильтрации жидкости; ε — коэффициент Джоуля—Томсона.

В дальнейшим будем пренебрегать продольной теплопроводностью, а также считать, что пористость достаточно мала, поэтому сла-

гаемое $c_l m\eta \frac{\partial P}{\partial t}$ в уравнениях теплопроводности (1) несущественно.

Для температуры примем следующие начальное и граничное условия:

$$T\big|_{t=0} = 0; \quad T_{|x=R_k} = T_0(t),$$

где R_k — радиус контура.

В начальный момент времени ($t = 0$) на границе пласта ($x = 0$) начинает работать добывающая галерея, на которой поддерживается постоянное давление P_g. При таком воздействии в пласте образуются две зоны, а именно, зона фильтрации длиной l и зона застоя. Граница раздела между этими зонами перемещается со временем по закону $l = l(t)$, причём $l(0) = 0$. В области фильтрации давление удовлетворяет уравнению [3]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial P}{\partial x} - G_0\right); \left|\frac{\partial P}{\partial x}\right| > G_0; 0 < x < l(t), \quad (2)$$

где χ — коэффициент пьезопроводности.

Вне области фильтрации давление равно пластовому давлению:

$$P(x, t) = P_0 \text{ при } x > l(t).$$

На границе $x = l(t)$ выполняются условия

$$P(l,t) = P_0; \ \frac{\partial P(l,t)}{\partial x} = G_0. \quad (3)$$

На границе $x = 0$ держится постоянное давление $P(0, t) = P_g$. В исходном состоянии давление везде однородно и равно $P(x, 0) = P_0$.

Необходимо найти распределения давления и температуры в области $0 < x < l(t)$, а также закон изменения $l(t)$ при условиях (3).

Скорость фильтрации будет определятся соотношениями

$$\upsilon = -\frac{k}{\mu}\left(\frac{\partial P}{\partial x} - G_0 \frac{\partial P/\partial x}{|\partial P/\partial x|}\right) \text{ при } \left|\frac{\partial P}{\partial x}\right| > G_0;$$

$$\upsilon = 0 \text{ при } \left|\frac{\partial P}{\partial x}\right| \leqslant G_0,$$

где k — коэффициент проницаемости; μ — вязкость жидкости.

Решение уравнения (2) находится методом интегральных соотношений. После некоторых выкладок получим выражения для описания распределения давления в области $0 < x < l(t)$

$$P(x,t) = P_0 - G_0(l(t) - x) - $$
$$- (\Delta P_0 - G_0 l(t))\left(1 - \frac{x}{l(t)}\right)^2;$$
$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = G_0 + \frac{2}{l(t)}(\Delta P_0 - G_0 l(t))\left(1 - \frac{x}{l(t)}\right), \quad (4)$$

где $\Delta P_0 = P_0 - P_g$ — перепад давлений.

В силу приведённых выше допущений, а также используя уравнения (4), уравнение (1) представим в виде

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{c_l}{c_s}\frac{k}{\mu}\frac{2}{l(t)}(\Delta P_0 - G_0 l(t))\left(l - \frac{x}{l(t)}\right)\times$$
$$\times\left\{\frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon\left(G_0 + \frac{2}{l(t)}(\Delta P_0 - G_0 l(t))\times\right.\right.$$
$$\left.\left.\times\left(l - \frac{x}{l(t)}\right)\right) - \eta G_0\right\} = 0. \quad (5)$$

Уравнение (5) решается модифицированным методом характеристик. Для нашего случая уравнение характеристики запишем в виде

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{c_l}{c_s}\frac{k}{\mu}\frac{2}{l(t)}[\Delta P_0 - G_0 l(t)]\left(1 - \frac{x}{l(t)}\right). \quad (6)$$

Величина $l(t)$ определяется из уравнений (3) с помощью интегрального соотношения, характеризующего условие материального баланса,

$$3\chi t = \left(\frac{\Delta P_0}{G_0}\right)^2 \ln\frac{\Delta P_0}{\Delta P_0 - G_0 l} - \left(\frac{\Delta P_0}{G_0} + \frac{l}{4}\right) l.$$

Решение уравнения (6) имеет вид

$$x(t) =$$
$$= \int_p^t \varphi(\xi)\exp\left(-\int_p^\xi \psi(\tau)d\tau\right)d\xi + x(p)\exp\left(\int_p^t \psi(\tau)d\tau\right),$$

где $\varphi(t) = -\frac{c_l}{c_s}\frac{k}{\mu}\frac{2}{l(t)}(\Delta P_0 - 2G_0 l(t))$; $\psi(t) = -\frac{c_l}{c_s}\frac{k}{\mu}\frac{2}{l(t)}\times$ $\times (G_0 l(t) - \Delta P_0)$; ξ, τ — переменные интегрирования.

На рис. 1 отражена динамика движения границы возмущённой области $l(t)$ при разных значениях начального градиента давления.

Уравнение изменения температуры в возмущённой области ($0 < x < l(t)$) имеет вид

$$\frac{dT}{dt} = \frac{c_l}{c_s}\frac{k}{\mu}\frac{2}{l(t)}(\Delta P_0 - G_0 l(t))\left(1 - \frac{x}{l(t)}\right)\times$$
$$\times\left\{\varepsilon\left(G_0 + \frac{2}{l(t)}(\Delta P_0 - G_0 l(t))\left(1 - \frac{x}{l(t)}\right)\right) - \eta G_0\right\}.$$

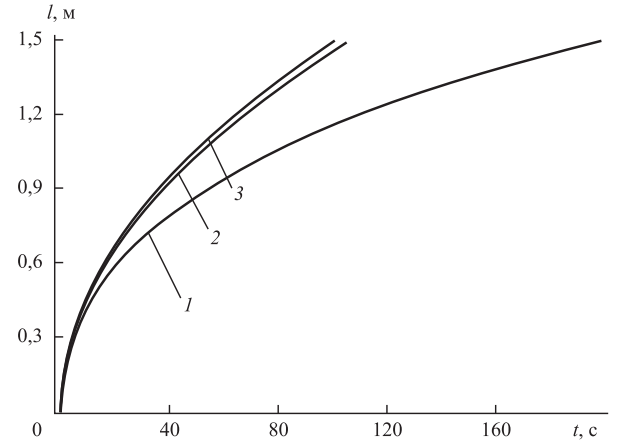


Рис. 1. Движение границы возмущённой зоны при разных значениях начального градиента давления:
1 — $G_0 = 0{,}95 \cdot 10^5$ Па/м; *2* — $G_0 = 0{,}085 \cdot 10^5$ Па/м; *3* — $G_0 = 0{,}0075 \cdot 10^5$ Па/м

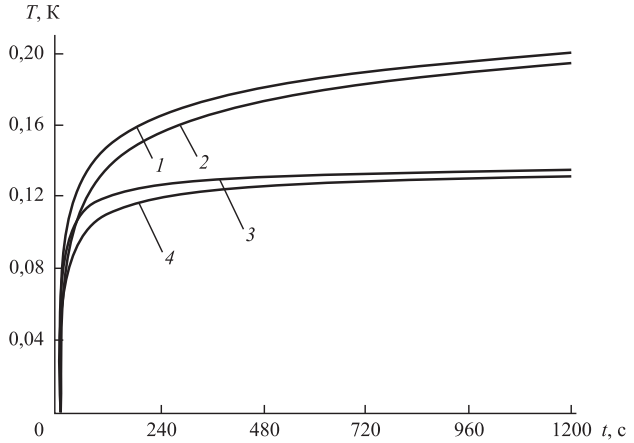


Рис. 2. Изменения температуры пласта при различных значениях *x* и начального градиента давления:
1 — $x = 0{,}4$ м; $G_0 = 0{,}95 \cdot 10^5$ Па/м; *2* — $x = 0{,}6$ м; $G_0 = 0{,}95 \cdot 10^5$ Па/м; *3* — $x = 0{,}4$ м; $G_0 = 0{,}5$ Па/м; *4* — $x = 0{,}6$ м; $G_0 = 0{,}5$ Па/м

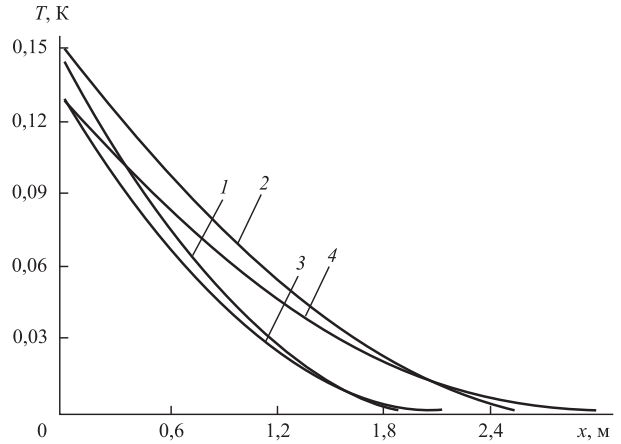


Рис. 3. Распределение температуры в возмущённой зоне при различных значениях времени и начального градиента давления:
1 — $t = 60$ мин; $G_0 = 0{,}95 \cdot 10^5$ Па/м; *2* — $t = 120$ мин; $G_0 = 0{,}95 \cdot 10^5$ Па/м; *3* — $t = 60$ мин; $G_0 = 0{,}01$ Па/м; *4* — $t = 120$ мин; $G_0 = 0{,}01$ Па/м

Отсюда получаем решение, описывающее распределение температуры в пласте,

$$T = \frac{c_l}{c_s}\frac{k}{\mu}\int_p^t \frac{2}{l(\tau)}\left(\Delta P_0 - G_0 l(\tau)\right)\left(1 - \frac{x(\tau)}{l(\tau)}\right) \times$$
$$\times \left\{ \varepsilon \left(G_0 + \frac{2}{l(\tau)}\left(\Delta P_0 - G_0 l(\tau)\right)\left(1 - \frac{x(\tau)}{l(\tau)}\right)\right) - \eta G_0 \right\} d\tau .$$

Таким образом, получено аналитическое решение, однако его анализ затруднён, так как зависимость $l(t)$ явно не выражена, поэтому ниже приводится численный расчёт.

Результаты вычисления с использованием конечно-разностной схемы для прямолинейно-параллельной задачи представлены в виде графиков. На рис. 2 приведено изменение температуры пласта при разных значениях *x* и начального градиента давления. На рис. 3 показано температурное поле возмущённой зоны в разные моменты времени и при различных значениях начального градиента давления. Из приведённых графиков следует, что при фильтрации аномальной жидкости вблизи границы температурный эффект выше (линии *1* и *2*), чем при фильтрации обычной жидкости (линии *3* и *4*).

Заключение. Получены аналитические решения для прямолинейно-параллельного фильтрационного течения вязкопластичной жидкости в пласте. Анализ полученных результатов показал, что при одинаковой скорости фильтрации вязкопластичной и ньютоновской жидкостей наличие начального градиента давления приводит к дополнительному нагреву пласта. С ростом значения начального градиента давления и вязкости жидкости тепловой эффект увеличивается.

Библиографические ссылки

1. **Мирзаджанзаде А.Х., Баренблатт Г.И., Ентов В.М.** и др. О возможном влиянии начального градиента давления на разработку многопластовых газовых и газоконденсатных месторождений при водонапорном режиме // Известия вузов. Сер. Нефть и газ. 1970. № 1. С. 39—49.

2. **Мирзаджанзаде А.Х., Ковалев А.П., Зайцев Ю.В.** Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей. М.: Недра, 1972. 200 с.

3. **Басниев К.С., Кочина И.Н., Максимов В.М.** Подземная гидродинамика. М.: Недра, 1993. 416 с.

4. **Хусаинова Г.Я.** Исследование температурных полей при стационарном течении аномальных жидкостей // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 7. С. 13—16.

УДК 531.3

Е.И. Акулинин, канд. техн. наук
(ООО «Экотехнологии»),
А.А. Ишин
(ООО «Энерготехпроект»),
С.А. Скворцов, канд. техн. наук, доц., **Д.С. Дворецкий,** д-р техн. наук, проф.,
С.И. Дворецкий, д-р техн. наук, проф.
(Тамбовский государственный технический университет)

akulinin-2006@yandex.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА АДСОРБЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВОЙ СМЕСИ И ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

Сформулированы задачи оптимизации режимных переменных (давления на стадии адсорбции и длительности цикла адсорбции) и автоматизации процесса адсорбционного разделения газовой смеси и получения водорода в четырёхадсорберной установке короткоцикловой безнагревной адсорбции. Приведены результаты имитационных исследований эффективности функционирования SCADA-системы адаптивной оптимизации и управления при ступенчатом изменении концентрации диоксида углерода, температуры и давления газовой смеси в питании установки.

Ключевые слова: короткоцикловая безнагревная адсорбция; разделение газовой смеси; водород; диоксид углерода; динамика процесса; математическая модель; оптимизация; возмущающие воздействия; управление.

The problems of regime variables optimization (pressure at the adsorption stage and the adsorption cycle duration) and automation of the adsorption separation process of a gas mixture and hydrogen reception in a four-unit short-cycle heatless adsorption system are formulated. The simulation studies results of the SCADA-system functioning efficiency for adaptive optimization and control at a step change in the carbon dioxide concentration, temperature and pressure of the gas mixture during facility feed are adduced.

Keywords: short-cycle heatless adsorption; separation of the gas mixture; hydrogen; carbon dioxide; dynamics of the process; mathematical model; optimization; disturbance effects; control.

Введение. Технологический процесс концентрирования водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси реализуется в четырёхадсорберной установке короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА) (рис. 1) [1].

Исходная газовая смесь после предварительной осушки поступает на вход установки КБА с избыточным давлением $(21 \pm 2)\cdot 10^5$ Па и температурой (30 ± 5) °С. Увеличение давления в адсорбционных колоннах $A_1...A_4$ осуществляется открытием управляемых клапанов $K_{1.1}$, $K_{2.1}$, $K_{3.1}$ и $K_{4.1}$ соответственно, через которые газовая смесь подаётся на входы адсорберов. В качестве адсорбента могут использоваться цеолиты CaA, NaX, LiLSX. Обогащённая водородом газовая смесь выводится из адсорберов также через управляемые клапаны $K_{1.2}$, $K_{2.2}$, $K_{3.2}$ и $K_{4.2}$ и через ресивер P направляется к потребителям. На этапе регенерации в адсорбционных колоннах осуществляется противоточная регенерация адсорбента путём пропускания обогащённой водородом газовой смеси через адсорбент в обратном направлении с коэффициентом обратного потока χ.

Формулировка задач оптимизации и автоматизации технологического процесса начинается с анализа его функционирования как объекта управления, который предполагает изучение статических и динамических свойств технологического процесса, выявление входных, основных возмущающих и управляющих воздействий, выходных (контролируемых) переменных, определение допустимых диапазонов их изменения. Проведённый в работах [2, 3] анализ процесса адсорбционного разде-

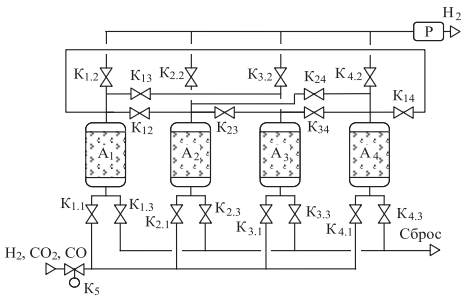


Рис. 1. Технологическая схема четырёхадсорберной установки КБА для получения водорода:
$A_1...A_4$ — адсорберы; K — управляемые клапаны; P — ресивер

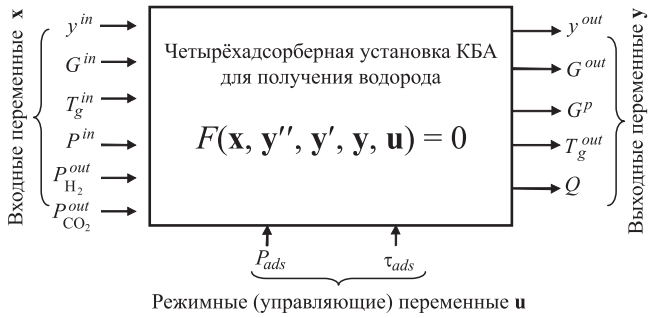


Рис. 2. Структурная схема установки КБА как объекта управления при получении водорода

ления газовой смеси и получения водорода в четырёхадсорберной установке КБА как объекта управления позволил определить (рис. 2):

входные переменные **x** (возмущающие воздействия) установки КБА (состав $y^{in} = (y_1^{in}, y_2^{in}, y_3^{in})$, температуру T_g^{in}, расход G^{in} и давление P^{in} газовой смеси в питании установки, давления на продукционном $P_{H_2}^{out}$ и на сбросном $P_{CO_2}^{out}$ выходах установки КБА), т. е. $\mathbf{x} = \left\{y^{in}, T_g^{in}, G^{in}, P^{in}, P_{H_2}^{out}, P_{CO_2}^{out}\right\}$;

режимные (управляющие) переменные **u** (давление P_{ads} и длительность цикла τ_{ads} стадии адсорбции), т. е. $\mathbf{u} = \{P_{ads}, \tau_{ads}\}$;

выходные переменные **y** установки КБА (состав $y^{out} = (y_1^{out}, y_2^{out}, y_3^{out})$, расходы G^{out}, G^p и температуру T_g^{out} газовой смеси на выходе из установки КБА, производительность установки $Q = y_1^{out}G^p$, где $G^p = G^{out} - G^{des}$, G^{des} — объёмный расход потока обогащённого водородом воздуха, направляемого на регенерацию адсорбента), т. е. $\mathbf{y} = \{y^{out}, G^{out}, T_g^{out}, Q\}$.

Математические модули процесса получения водорода в четырёхадсорберной установке КБА. Математическое описание динамики процесса адсорбции, осуществляемого в адсорберах установки КБА получения водорода [1], можно наглядно представить в виде блок-схемы математического модуля «Адсорбер» (рис. 3). На рис. 3 приняты следующие обозначения: ε, ε_0 — коэффициенты порозности адсорбента с учётом и без учёта пористости гранул соответственно; D_g^k — эффективный коэффициент продольного перемешивания k-го компонента в газовой смеси, м^2/с; x — пространственная координата по оси адсорбера (высоте в слое адсорбента), м; t — время, с; c_v^g — удельная теплоёмкость газовой смеси при постоянном объёме, Дж/(моль·К); ρ_g — мольная плотность газовой смеси, моль/м^3; T_g — температура газовой смеси, К; T_a — температура адсорбента, К; λ_g, λ_a — теплопроводности газовой смеси и адсорбента соответственно, Вт/(м·К); α — коэффициент теплоотдачи от поверхности гранул адсорбента к потоку газовой смеси, Вт/(м^2·К); $S_u = (1-\varepsilon)\dfrac{3}{r_{gr}}$ — коэффициент удельной поверхности гранул адсорбента, м^2/м^3; r_{gr} — радиус гранулы адсорбента, м; c_p^a — удельная теплоёмкость адсорбента при постоянном давлении, Дж/(кг·К); ρ_a — плотность адсорбента, кг/м^3; c_p^g — удельная теплоёмкость газовой смеси при постоянном давлении, Дж/(моль·К); h_k^a — теплота адсорбции k-го компонента газовой смеси, Дж/моль; ψ — коэффициент сферичности гранул адсорбента; μ_g — динамическая вязкость газовой смеси, Н·с/м^2; M_g — молярная масса газовой смеси, кг/моль; b — вектор параметров изотермы сорбции Ленгмюра—Фрейндлиха [4].

Математическая модель отличается от известных учётом влияния процессов массо- и теплопереноса и скорости потока многокомпонентной газовой смеси на кинетику смешанно-диффузионного переноса адсорбтива (H_2, CO_2, CO) и позволяет рассчитывать профили концентраций компонентов и температуры в газовой и твёрдой фазах, давления и скорости газовой смеси по высоте адсорбента L в зависимости от времени.

Настроечными параметрами математической модели являются коэффициенты массоотдачи β_k^1 ($k = 1$ — для H_2, $k = 2$ для CO_2, $k = 3$ для CO) и формальные кинетические параметры β_k^2 и θ уравнения массопереноса адсорбтива (H_2, CO_2, CO) из газовой фазы в твёрдую фазу адсорбента (через границу раздела фаз):

$$\frac{\partial a_k}{\partial t} = \frac{F_k^2 - F_k^1}{2}\,\mathrm{tgh}(\theta(\nu_g - \nu_g^*) + 1) + F_k^1;\ k = 1, 2, 3,$$

где a_k — величина сорбции k-го компонента в адсорбенте, моль/м^3; F_k^1 — правая часть уравнения кинетики нестационарного конвективного (внешнего) массообмена, $F_k^1 = \beta_k^1(c_k - c_k^*)$; β_k^1 — коэффициент массоотдачи, отнесённый к концентрации адсорбтива в газовой фазе, 1/с; c_k — мольная концентрация k-го компонента газовой смеси, моль/м^3; c_k^* — концентрация адсорбтива на поверхности раздела фаз или равновесная текущей величине адсорбции a_k, моль/м^3; F_k^2 — правая часть уравнения кинетики внутридиффузионного процесса адсорбции, $F_k^2 = \beta_k^2(a_k^* - a_k)$; β_k^2 — кинетический коэффициент, 1/с; a_k^* — величина адсорбции, равновесная текущей концентрации адсорбтива c_k в потоке газовой смеси на внешней поверхности гранул, моль/м^3; ν_g — скорость газовой смеси, м/с; ν_g^* — критическая скорость газовой смеси, определяющая переход от диффузионной области (внешней массоотдачи) к кинетической области (внутренней диффузии в гранулах адсорбента) переноса адсорбтива, м/с.

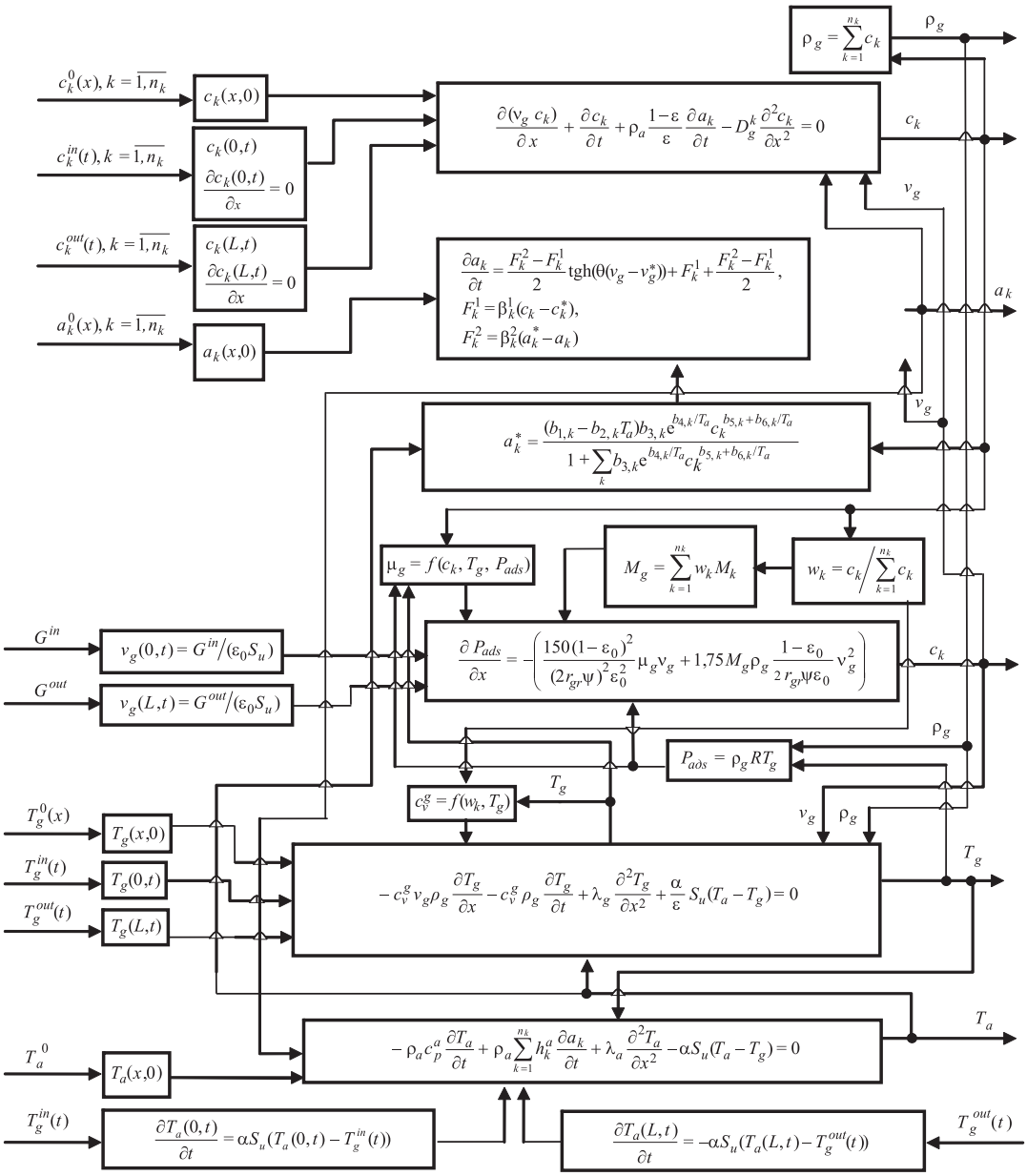


Рис. 3. Структурная схема математического описания модуля «Адсорбер»

Конкретный вид уравнений для определения параметров настройки модели приведён в работах [2, 3]. Однако числовые значения параметров, получаемые по этим уравнениям, $v_g^* = 0{,}022$ м/с; $\beta_{H_2}^1 = 0{,}816$ 1/с; $\beta_{CO_2}^1 = 0{,}021$ 1/с; $\beta_{CO}^1 = 0{,}084$ 1/с; $\beta_{H_2}^2 = 0{,}73$ 1/с; $\beta_{CO_2}^2 = 0{,}012$ 1/с; $\beta_{CO}^2 = 0{,}059$ 1/с; $\theta = 18{,}2$ рекомендуем использовать в качестве начальных приближений для решения обратной коэффициентной задачи с использованием уравнений математической модели [3].

Состояние клапана описывается компонентами вектора $\boldsymbol{\sigma}$, которые являются булевыми переменными, принимающими значения 0 или 1. Конкретный вид функции $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}(t)$ определяется на основании циклограммы переключения клапанов установки КБА [2, 3]. Математическое описание режима работы системы клапанов четырёхадсорберной установки КБА для получения водорода можно наглядно представить в виде блок-схемы математического модуля «Система клапанов» (рис. 4).

Наконец, математическое описание ресивера включает в себя уравнения динамики давления и концентраций компонентов разделяемой газовой смеси, и его можно наглядно представить в виде блок-схемы математического модуля «Ресивер» (рис. 5).

Объёмный расход потока, направляемого в ресивер P, определялся как

$$G^p = G^{out} - G^{des},$$

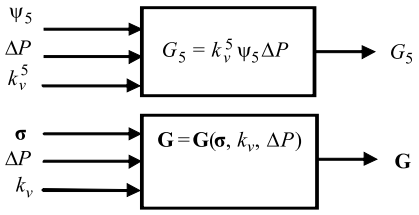


Рис. 4. Структурная схема математического описания модуля «Система клапанов»:
G_5 — расход через регулирующий клапан K_5, м^3/с; k_v^5 — пропускная способность клапана K_5, м^3/(с·Па); ψ_5 — степень открытия клапана K_5; ΔP — перепад давлений на клапане K_5, Па; $\mathbf{G} = \mathbf{G}(\sigma, k_v, \Delta P)$ — система уравнений, определяющая расходы газа, проходящего через отсечные клапаны $K_{1.1}$—$K_{4.1}$, $K_{1.2}$—$K_{4.2}$, $K_{1.3}$—$K_{4.3}$, K_{12}, K_{13}, K_{14}, K_{23}, K_{24}, K_{34} установки КБА [1]

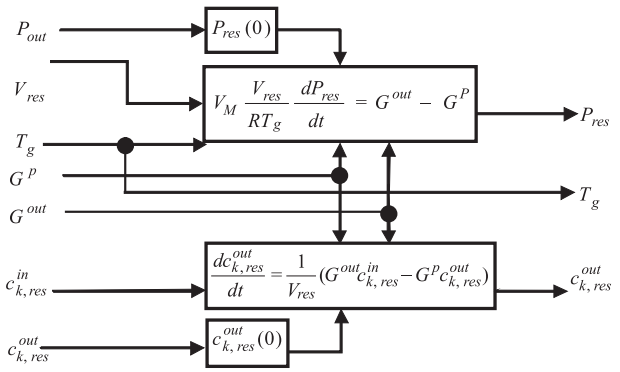


Рис. 5. Структурная схема математического описания модуля «Ресивер»:
V_M — молярный объём, м^3/моль; V_{res} — объём ресивера, м^3; P_{res} — давление газовой смеси в ресивере, Па; P_{out} — давление продукционной газовой смеси, Па; G^p — расход продукционной газовой смеси, м^3/с; G^{out} — расход продукционной газовой смеси на выходе из адсорберов A_1...A_4, м^3/с, определяется логическим выражением $G^{out} = G_{1,2}\sigma_{1,2} \vee G_{2,2}\sigma_{2,2} \vee G_{3,2}\sigma_{3,2} \vee G_{4,2}\sigma_{4,2}$; $c^{in}_{k,res}$, $c^{out}_{k,res}$ концентрации компонентов газовой смеси на входе и выходе из ресивера соответственно.

где $G^{des} = \chi G^{in} \dfrac{P_{des}}{P_{ads}}$ — объёмный расход потока, обогащённого водородом, направляемого на десорбцию H_2, CO_2, CO и сброс в атмосферу; χ — коэффициент обратного потока; P_{ads}, P_{des} — давления на стадиях адсорбции и десорбции соответственно.

Далее концентрации водорода, диоксида и оксида углерода будем обозначать через $y = (y_1, y_2, y_3)$, % об.

Постановка задачи оптимизации режимных переменных функционирования установки КБА. Численные исследования процесса получения водорода методом КБА при разделении многокомпонентной газовой смеси позволили определить наиболее опасные возмущающие (состав $y^{in} = (y_1^{in}, y_2^{in}, y_3^{in})$, температуру T_g^{in}, давления P^{in} газовой смеси на входе установки КБА, на продукционном $P_{H_2}^{out}$ и сбросном $P_{CO_2}^{out}$ выходах установки) и эффективные управляющие (давление P_{ads} газовой смеси на стадии адсорбции и длительность цикла τ_{ads} стадии адсорбции) воздействия. Задача оптимизации технологического процесса получения водорода по технологии КБА может быть сформулирована следующим образом: при заданных диапазонах изменения возмущающих воздействий $\mathbf{x} = \left\{y^{in}, T_g^{in}, G^{in}, P^{in}, P_{H_2}^{out}, P_{CO_2}^{out}\right\}$ требуется найти вектор допустимых управлений $\mathbf{u} = \left(P_{ads}, \tau_{ads}\right)$, при котором целевая функция — среднее значение концентрации y_1^{out} продукционного водорода на заданном периоде времени $[0, t_{pr}]$ прогнозирования работы установки КБА достигает экстремального значения, т. е.

$$I(\mathbf{u}^*) = \left(\frac{1}{t_{pr}} \int_0^{t_{pr}} y_1^{out}(\mathbf{u}^*)dt\right) = \max_{\mathbf{u}=\{P_{ads},\, t_{ads}\}} \left(\frac{1}{t_k} \int_0^{t_{pr}} y_1^{out}(\mathbf{u}^*)dt\right), \quad (1)$$

выполняются связи в форме уравнений математической модели (см. рис. 3) и ограничения:

на концентрацию продукционного водорода y_1^{out}

$$\underline{y_1^{out}} - y_1^{out} \leqslant 0; \quad (2)$$

производительность Q установки КБА

$$\underline{Q} \leqslant Q \leqslant \overline{Q}; \quad (3)$$

расход газовой смеси G^{in} в питании установки КБА

$$\underline{G^{in}} \leqslant G^{in} \leqslant \overline{G^{in}}; \quad (4)$$

давление адсорбции P_{ads}

$$P^{in} \leqslant P_{ads}. \quad (5)$$

В формулах (2)...(4) $\underline{z}$, $\overline{z}$ — нижние и верхние предельно допустимые значения технологических переменных.

Сформулированная задача (1)...(5) относится к классу задач нелинейного программирования, и для её решения будем использовать методы штрафных функций и последовательного квадратичного программирования [5].

Автоматизация установки КБА для получения водорода. Для оперативного решения задачи оптимизации (1)...(5) и управления процессом получения водорода разработана двухуровневая SCADA-система адаптивной оптимизации и управления.

Технологические переменные установки адсорбционного получения водорода подвержены случайным изменениям в ходе процесса адсорбции. Значения возмущений, которые представлены нерегулируемыми переменными исходной

газовой смеси в питании установки КБА, в ходе процесса также изменяются случайным образом. В этом случае необходимо поддерживать априори неизвестное максимальное значение заданной целевой функции оптимизации, что обусловливает применение системы адаптивной оптимизации и управления с изменяемыми заданиями (автоматическим регуляторам), работающей по принципу управления по возмущению с эталонной моделью технологического процесса в контуре управления.

В SCADA-системе адаптивной оптимизации и управления осуществляется непрерывный контроль текущих значений возмущающих воздействий и при отклонении возмущающих воздействий от номинальных значений на верхнем уровне с помощью персонального компьютера оперативно решается задача оптимизации (1)...(5) и определяются текущие оптимальные задания $\hat{\mathbf{u}} = (\hat{P}_{ads}, \hat{\tau}_{ads})$ регуляторам автоматической системы регулирования технологического процесса получения водорода, функционирующей на нижнем уровне.

На основании полученного значения $\hat{\tau}_{ads}$ пересчитывается циклограмма $\hat{\mathbf{U}}$ работы клапанов, и с помощью программного задатчика (ПЗ) осуществляется её реализация в четырёхадсорберной установке КБА для получения водорода. Текущее оптимальное значение $\hat{P}_{ads}$ поступает в качестве задания пропорционально-интегрально-дифференцирующему регулятору одноконтурной системы автоматического регулирования с обратной связью (рис. 6).

Таким образом, SCADA-система адаптивной оптимизации и управления режимами функционирования установки КБА обеспечивает выполнение следующих функций: поиск и поддержание оптимального значения чистоты y_1^{out} получаемого водорода; расчёт текущего оптимального времени шага адсорбции $\hat{\tau}_{ads}$; расчёт и реализация оптимальной циклограммы работы клапанов в четырёхадсорберной установке КБА для получения водорода; расчёт текущего оптимального давления адсорбции $\hat{P}_{ads}$; расчёт и формирование управляющих воздействий на приводы клапанов [3].

Имитационные исследования системы управления. Результаты сравнительного анализа работы установки КБА при наличии адаптивной оптимизации и без адаптивной оптимизации в SCADA-системе управления приведены в таблице.

На рис. 7 представлены результаты имитационных исследований функционирования SCADA-системы управления при ступенчатом изменении возмущающих воздействий.

Анализ переходных процессов в SCADA-системе адаптивной оптимизации и управления (рис. 7) при ступенчатом изменении доли CO_2 в потоке газовой смеси на входе в установку КБА позволяет сделать вывод о том, что в установке КБА с адаптивной оптимизацией и управлением наблюдается уменьшение концентрации продукционного водорода с 99 до 96 % об., в то время как в установке без адаптивной оптимизации — с 94 до 87 % об. При этом SCADA-система обеспечивает поддержание концентрации y_1^{out} продукционного водорода на максимально возможном уровне для изменившихся характеристик исходной газовой смеси в питании установки и выполнение ограничения (3) на допустимую производительность установки.

Из анализа переходных процессов в SCADA-системе адаптивной оптимизации и управления при ступенчатом повышении температуры T_g^{in} исходной смеси с 30 до 50 °С (на рис. 7 не показаны) следует, что SCADA-система компенсирует ступенчатое возмущение уменьшением длительности стадии адсорбции с 42 до 36 с. При этом SCADA-система обеспечивает поддержание концентрации продукционного водорода на уровне ~99 % об. и производительности установки Q на минимально до-

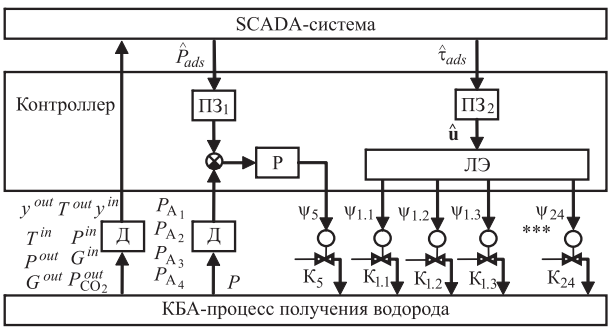


Рис. 6. Структурная схема системы управления:
ψ — степень открытия клапана; Д — датчик; Р — регулятор; ЛЭ — логический элемент; ПЗ — программный задатчик

Данные для анализа эффективности работы установки КБА

Возмущающее воздействие (ступенчатое увеличение)	I^*, % об.	I, % об.	ΔI, % об.
y_2^{in} (с 34 до 45 % об.)	95,76	89,46	6,3
T_g^{in} (с 30 до 50 °С)	98,92	94,13	4,79
$P_{H_2}^{out}$ (до 0,3 МПа)	98,92	95,09	3,83
$P_{CO_2}^{out}$ (до 0,1 МПа)	96,51	90,22	6,29

Обозначения: I^*, I — значения целевой функции при наличии адаптивной оптимизации в системе управления и без неё соответственно.

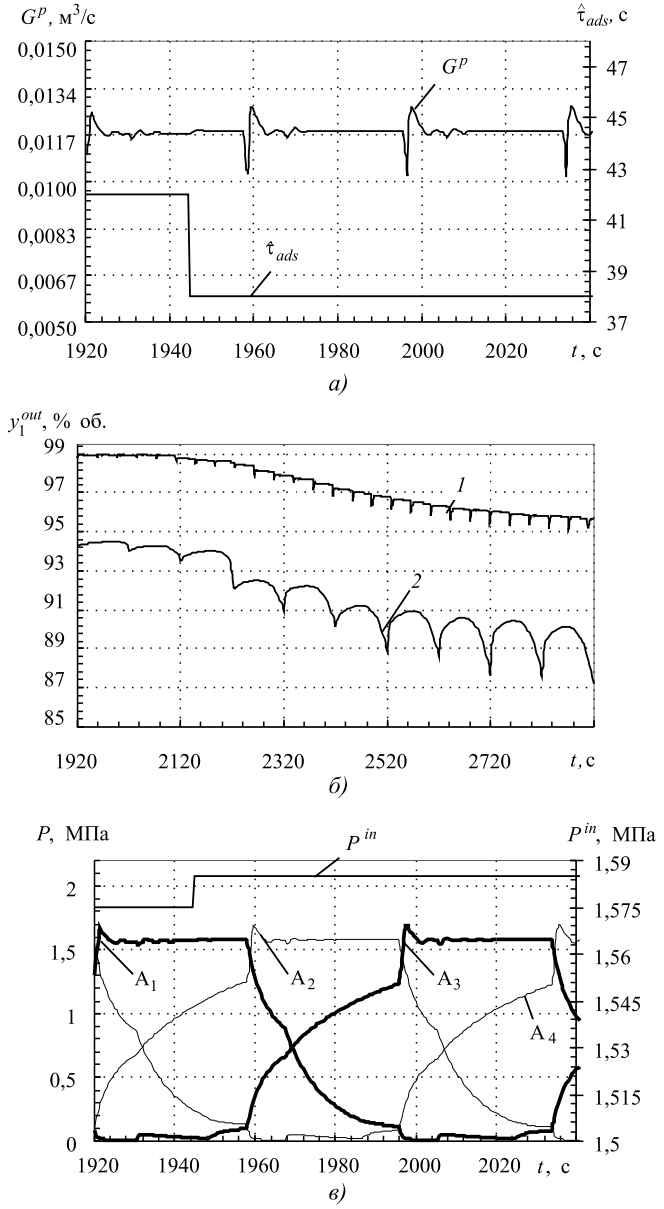


Рис. 7. Переходные процессы в SCADA-системе управления при ступенчатом увеличении содержания CO_2 в исходной смеси с 30 до 45 % об.:

а — изменение расхода G^p продукционного водорода и оптимального времени цикла адсорбции $\hat{\tau}_{ads}$ в зависимости от времени; *б* — изменение концентрации продукционного водорода y_1^{out} в зависимости от времени при наличии адаптивной оптимизации (*1*) и без адаптивной оптимизации (*2*); *в* — изменение давлений в адсорберах A_1...A_4 установки КБА

пустимом уровне (рис. 7, *а*), в то время как в установке КБА без адаптивной оптимизации концентрация продукционного водорода устанавливается на уровне ~94 % об.

Анализ графиков переходных процессов в SCADA-системе при повышении давления $P_{H_2}^{out}$ на продукционном выходе установки КБА до 0,3 МПа показывает, что SCADA-система повышает давление адсорбции P_{ads} с незначительным сокращением времени цикла τ_{ads} адсорбции. При этом производительность Q установки КБА поддерживается в допустимом диапазоне и обеспечивается максимально возможная для изменившихся условий чистота продукционного водорода y_1^{out} = 99 % об. В установке КБА без адаптивной оптимизации чистота продукционного водорода устанавливается на уровне y_1^{out} = 95 % об.

Заключение. На основе современных методов системного анализа, математического моделирования и теории управления получены новые научные результаты, важные для теории и практики создания автоматизированных технологических процессов адсорбционного разделения газовых смесей с циклически изменяющимся давлением. Разработано математическое, информационное и алгоритмическое обеспечение двухуровневой SCADA-системы адаптивной оптимизации и управления четырёхадсорберной установки КБА, способствующее получению водорода с чистотой 96...99 % об.

Методом имитационного моделирования подтверждена работоспособность разработанной двухуровневой SCADA-системы адаптивной оптимизации и управления и получены оценки эффективности её функционирования в условиях возмущающих воздействий (сравниваются эффективности работы установок КБА с адаптивной оптимизацией и без адаптивной оптимизации): 1) при увеличении доли CO_2 в потоке газовой смеси и температуры газовой смеси на входе в установку КБА прирост чистоты продукционного водорода составил 6,3 % и 4,8 % об. соответственно; 2) при изменении давлений на продукционном и сбросном выходах установки КБА прирост чистоты целевого продукта составил 3,8 % и 6,3 % об. соответственно.

Работа выполнена в рамках проектной части Государственного задания № 10.3533.2017/ПЧ.

Библиографические ссылки

1. **Baksh M.S.A.** et al. // Патент США № 6340382. 2002.
2. **Васильев А.С., Ишин А.А., Скворцов С.А.** Математическое моделирование процесса получения водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2014. № 3 (53). С. 37—46.
3. **Ишин А.А.** Математическое моделирование и управление процессом получения водорода методом адсорбционного разделения газовой смеси: дис. ... канд. техн. наук. Тамбов: ТГТУ, 2017. 152 с.
4. **Jee J.G., Kim M.B., Lee C.H.** Adsorption characteristics of hydrogen mixtures in a layered bed: binary, ternary, and five-component mixtures // Ind. Eng. Chem. Res. 2001. Vol. 40. P. 868—878.
5. **Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К.** Оптимизация в технике. В 2 кн. Кн. 2. М.: Мир, 1986. 320 с.

УДК 62-522.2

М.С. Денисов, В.Ф. Коростелёв, д-р техн. наук, проф.
(Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

denisovmaxim90@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ОБРАБОТКИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА ДАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

Представлены результаты исследований, направленных на формирование мелкозернистой структуры и повышение физико-механических свойств алюминиевого сплава в процессе обработки жидкого металла давлением. Объектом управления является горизонтальный гидравлический пресс ПЛД-300 с усилием запирания в цилиндре 300 т. Давление, накладываемое на металл, составляет 500 МПа. Управление процессом осуществляется с помощью адаптивной системы с эталонной моделью. Объектом исследования является процесс получения литых заготовок диаметром 90 и длиной 57 мм. В качестве исходного материала используется высокопрочный алюминиевый сплав В95.

Ключевые слова: адаптивная система управления; эталонная модель; автоматизация; микроструктура; отливка; наложение давления; жидкий металл; физико-механические свойства.

The research results aimed at forming a fine-grained structure and increasing the physical-mechanical properties of an aluminum alloy during the treatment of a liquid metal by pressure are presented. The control object is a horizontal hydraulic press PLD-300 with a cylinder locking force of 300 tons. The pressure imposed on the metal is 500 MPa. The process is controlled using an adaptive system with a reference model. The object of the study is the process of producing cast billets with a diameter of 90 and a length of 57 mm. The high-strength aluminum alloy B95 is used as a raw material.

Keywords: adaptive control system; reference model; automation; microstructure; casting; superposition of pressure; liquid metal; physical and mechanical properties.

Введение. Алюминиевый сплав В95 — один из самых универсальных и распространённых конструкционных материалов системы Al—Zn—Mg—Cu. Он обладает наибольшей удельной прочностью из всех известных алюминиевых сплавов. Его временное сопротивление разрыву на 20 % выше, а предел текучести на 40 % больше, чем у дюралюминия Д16. Благодаря таким уникальным эксплуатационным характеристикам, которые не уступают свойствам стали, он активно используется при создании деталей самолётов, ракет и космических спутников. Однако в данном классе изделий уровень механических свойств достигается за счёт применения той или иной технологии их производства. В зависимости от предъявляемых технических и экономических требований, выбирается определённый материал для производства детали и, что наиболее важно, способ её изготовления [1].

В настоящее время наиболее перспективным способом изготовления деталей из сплава В95 является изостатическая штамповка заготовки с последующей механической обработкой. Несмотря на высокое качество получаемых изделий, у этого способа имеется ряд недостатков, одним из которых является сложная и дорогостоящая технология получения заготовки детали. На сегодняшний день промышленность не может обеспечить выпуск заготовок по требованиям заказчика, т. е. не может обеспечить большую номенклатуру данных заготовок по химическому составу с заданными физико-механическими свойствами. Существующая технология включает в себя следующие энергозатратные операции: получение литой заготовки, протягивание её свободной ковкой с коэффициентом вытяжки не менее 30 % в размер, когда длина по меньшей мере в два раза превышает диаметр. Далее заготовку осаживают в формовочном штампе в двойной усечённый конус с углом конусности не менее 10 %. После осадки обратным прессованием со степенью деформации не менее 40 % формируют необходимые свойства — текстуру металла. Таким образом, технологический процесс состоит из следующих операций: получение исходной заготовки — слитка, протяжка на молоте, осадка на конус, осадка, заготовительная штамповка, предварительная штамповка, окончательная штамповка, механическая обработка [2—4].

Предлагается сократить число операций до трёх: получение исходной заготовки, изостатическая штамповка и механическая обработка. Это становится возможным за счёт использования технологии обработки жидкого металла давлением (ОЖМД), которая включает наложение высокого давления на жидкий металл и систему адаптивного управления процессом формирования заготовки детали. Такой подход позволяет получать заготовки нужного размера, с заданными физико-механическими и структурными свойствами.

Существующие технологии и системы автоматизированного управления, полностью охватывающие процесс изготовления заготовок, например автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУТП) непрерывного литья, в полной мере не оказывают влияния на сам процесс формирования свойств отливок [5—7].

Выбор эталонной модели. На этапе предварительных исследований было отмечено, что при опрессовке массивных отливок на компенсацию их усадки требуется дополнительный объём ~ 10 % от общего объёма металла [8, 9]. Осциллографирование перемещения плунжеров, изменения давления в гидросистеме и усилия запирания формы позволило уточнить значение сжимаемости жидкого металла и установить важные кинетические закономерности [10].

В качестве параметра, характеризующего поведение жидкого металла, предлагается коэффициент относительной сжимаемости, как отношение объёма запрессованного внутрь отливки металла к первоначальному объёму, т. е.

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_{\text{о}}} \cdot 100\ \%,$$

где ΔV — объём металла, запрессованного внутрь отливки в данное время; $V_{\text{о}}$ — объём полости формы, в которую залит металл.

Таким образом, коэффициент сжимаемости характеризует изменение объёма металла при наложении давления.

На основе проведённых исследований установлено, что сжимаемость жидкого металла достигает 12,4 % [11, 12]. В ходе проведения экспериментов было выявлено, что на первом этапе давление необходимо для заполнения полости формы металлом, далее в течение 8...10 с жидкий металл, не оказывая заметного сопротивления, сжимается примерно на 10 %, после чего следует фаза медленного изменения объёма в течение 80...100 с, зависимость имеет характер, близкий к линейному. Поэтому предлагается накладывать давление в три фазы: заполнение камеры опрессовки металлом; опрессовка жидкого металла; опрессовка кристаллизирующегося металла.

В первой фазе давление на жидкий металл невысокое, далее оно возрастает до 400 МПа (вторая фаза) и в последней фазе опрессовки достигает 500 МПа. Только при давлении 500 МПа возможна дальнейшая опрессовка.

Следует обратить внимание на то, что в первых двух фазах ε = 10 %, что значительно выше объёмной усадки, в третьей фазе прирост ε = 2,3...2,4 %, где ε — сжимаемость жидкого металла [13, 14].

Можно предположить, что в первых двух фазах происходит сравнительно лёгкое сближение атомов на расстояние, соизмеримое с амплитудой колебания атомов относительно исходного положения. Дальнейшее уменьшение объёма металла, вероятно, связано с переходом атомов из жидкого состояния в твёрдое, сопровождаемое выделением скрытой теплоты кристаллизации, когда преодолевая сопротивление атомов, можно запрессовать дополнительный объём на уплотнение металла и формирование дополнительных межатомных связей. Часть проталкиваемого объёма обеспечивает заполнение формы, а оставшаяся часть впрессовывается внутрь объёма заготовки под высоким давлением. Жидкий металл уменьшается в объёме, его атомы сближаются практически на то же расстояние, как и в твёрдом металле, поэтому после опрессовки в жидком состоянии последующая кристаллизация происходит без усадки и образования дефектов. Такая технология позволяет не использовать целый ряд подготовительных операций, при этом качество получаемой заготовки остаётся на самом высоком уровне [15, 16].

Установленная закономерность существенно расширяет представления о поведении жидкого металла в условиях наложения статического давления, но не в полной мере раскрывает его свойства как объекта управления (ОУ). Для создания эффективной системы управления наложением давления необходимо определить также значения параметров, которые определяют свойства объекта [17, 18].

Знание закона изменения сжимаемости металла позволяет с большой точностью создать систему управления процессом. В то же время необходимо управлять самим процессом формирования отливки, а для этого необходимо иметь информацию о влиянии каждого фактора в отдельности и всех факторов в комплексе [19].

Получение высококачественной металлопродукции достижимо на основе контроля параметров обработки информации и принятия решений для организации управления процессом [20, 21].

В этой связи необходимо при исследовании процессов определить значимые факторы и их влияние на свойства отливки, и на основе математического описания определить закон управления. Такая система управления с полным правом может быть отнесена к классу самонастраивающихся систем с эталонной моделью (СНС с ЭМ) [22]. В данном случае скрытым свойством является «сжимаемость» жидкого металла, характеризующая переход из состояния относительно быстрой сжимаемости на величину ~10 % в состояние замедленной сжимаемости под давлением не менее 500 МПа на величину ~ 2,4 %, а эталонной моделью служит кривая изменения давления в гидросистеме пресса во времени (рис. 1).

Система управления процессом обработки жидкого металла давлением. Адаптивные системы с эталонной моделью работают по принципу прямого адаптивного управления (рис. 2).

Предлагается осуществить синтез адаптивной системы с эталонной моделью методом Ляпунова. Так, второй метод Ляпунова позволяет узнать, стабильно ли состояние равновесия нелинейной системы $\dot{x}(t) = f[x(t), t]$, не находя

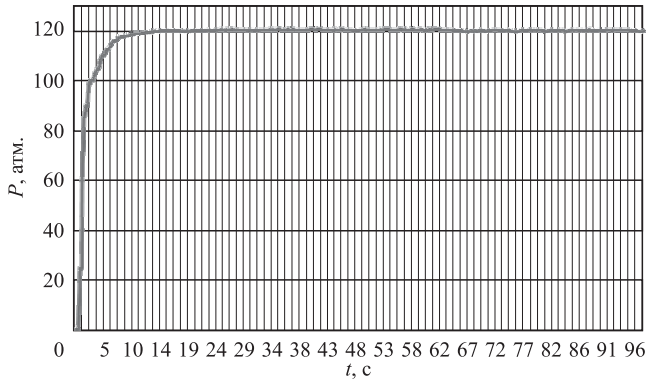


Рис. 1. Изменение давления в гидросистеме пресса во времени:
P — давление в гидроцилиндре; *t* — время

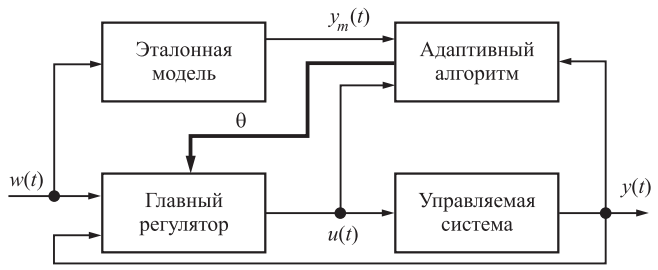


Рис. 2. Адаптивная система с эталонной моделью

соответствующего системе решения уравнения. Метод основан на построении скалярной функции с известными свойствами $V(x, t)$ и дальнейшем анализе производной по времени $V(x, t)$ в решениях системы [23]. Воспользуемся вторым методом Ляпунова. Если удаётся найти такую функцию Ляпунова $V(x, t)$, что

$$V(x, t) > 0, \text{ если } x \neq 0;$$

$$\dot{V}(x, t) < 0, \text{ если } x \neq 0;$$

$$V(x, t) \to \infty, \text{ если } |x| \to \infty;$$

$$V(x, t) = 0, \text{ если } x = 0,$$

тогда состояние равновесия $x = 0$ является асимптотически стабильным. Если функция $V(x, t)$ задана отрицательно частично, то состояние равновесия $x = 0$ только стабильно.

Основными этапами синтеза являются:

выбор типа главного регулятора и структуры;

составление уравнения ошибки, которое имеет вид

$$\dot{e}(t) = f_e[e(t)] + g_e[p(t)];$$

составление функции Ляпунова:

$$V(e, p) = f_e[e(t)] + g_e[p(t)];$$

вычисление производной от функции Ляпунова $V(e, p)$ по времени и траектории из уравнения ошибки

$$\dot{V}(e, p) = \dot{f}_e[e(t)] + \dot{g}_e[p(t), \dot{p}(t)];$$

анализ полученного результата и нахождение алгоритмов настройки параметров регулятора с помощью выражения

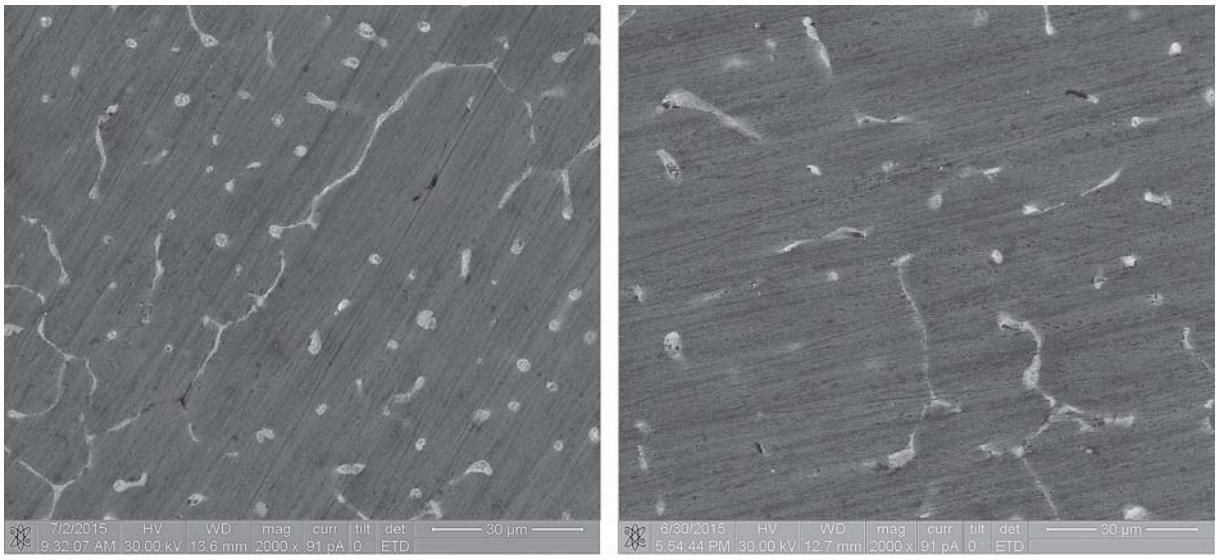
$$\dot{g}_e[p(t), \dot{p}(t)] = 0;$$

формирование алгоритмов настройки адаптивного регулятора и при необходимости его модификация, алгоритмы настройки имеют вид

$$p(t) = -\dot{G}e(t)s^T(t).$$

Обработка жидкого металла давлением осуществляется с применением адаптивного регулятора. В качестве оборудования используется гидравлический пресс ПЛД-300 с усилием запирания в цилиндре 300 т. Величина накладываемого давления на металл составляет 500 МПа. Управление технологическим процессом осуществляется с помощью адаптивной системы управления с эталонной моделью.

Формирование отливки осуществляется в специальной технологической оснастке. Ос-



а) *б)*

Рис. 3. Микроструктура сплава В95:
а — полученного по разрабатываемой технологии; *б* — полученного по традиционной технологии (прокат)

настка изготовлена из стали 5ХНМ с толщиной стенки матрицы 50 мм. Из полученных слитков диаметром 90 мм и длиной 57 мм вырезают образцы для механических испытаний и структурных исследований. В качестве исходного материала используется высокопрочный алюминиевый сплав В95.

Исследования механических свойств опытных образцов на разрыв проводятся на универсальной электромеханической испытательной машине с компьютерным управлением серии WDW—100E. Все образцы изготовлены в соответствии с ГОСТ 1497—84 и имеют одинаковые геометрические размеры. Для измерения твёрдости по Бринеллю в соответствии с ГОСТ 23677—79 используется твёрдомер ТШ-2.

Микроструктура исследуется на растровом электронном микроскопе FEI Quanta 200 3D, который позволяет вести наблюдения образцов во вторичных и отражённых электронах. Ускорение и фокусировка пучка происходят в колонне, в верхней части которой находится электронная пушка. Система электронной оптики формирует узкий зонд, а также позволяет отклонять его в сторону, направляя в определённые точки образца. Образец окружён аппаратурой — детектором отражённых и вторичных электронов, рентгеновским спектрометром. Образцы исследуются в вакуумной среде (разрешение микроскопа ×2000), что позволяет в достаточной мере изучить микронеоднородность поверхности образца.

Далее сравнивают микроструктуру сплава В95, полученного по разрабатываемой технологии (рис. 3, *а*) и микроструктуру того же сплава, полученного по традиционной технологии (рис. 3, *б*). Результаты сравнения приведены в таблице.

Из таблицы видно, что влияние давления на прочностные характеристики усиливается с увеличением скорости наложения давления.

Полученные результаты. Металлографические исследования и анализ структур образцов (см. рис. 3, *а* и *б*) показали, что благодаря используемой технологии удалось добиться сформированности структуры, близкой к структуре проката. За счёт наложения давле-

Механические свойства расплава после обработки жидкого металла давлением в сравнении с традиционной технологией

Образец	Технология	Размер получаемой заготовки, мм	Марка сплава	*P*, МПа	HRB	σ, МПа
1	ОЖМД с использованием СНС с ЭМ	90 × 57	В95	500	55	220
2	Традиционная технология (прокат)	90 × 57	В95	—	57	228

Примечания: *P* — величина накладываемого давления на металл; HRB — твёрдость по Роквеллу; σ — временное сопротивление разрыву.

ния на жидкий металл по заданному закону удалось добиться формирования однородной структуры. В материале с такой структурой анизотропия свойств сведена к минимуму.

Обращает на себя внимание размытость границ зёрен. Дендритные ячейки плотно спрессованы по прямым линиям и разориентированны под углом ~ 120°, отсюда следует предположение об объёмном характере кристаллизации из отдельных центров, которые, разрастаясь, вытесняют фазы на границы ячеек. Однако избыточные фазы видны не на всех границах, что может быть связано с образованием в ячейках перенасыщенного твёрдого раствора [24].

Контроль изменения давления на всех этапах формирования структуры должен быть направлен на поддержание таких технологических режимов, при которых легирующие элементы, по возможности, оставались в твёрдом растворе. Изменением температуры и времени выдержки в процессе охлаждения отливки в форме можно инициировать распад твёрдого раствора в интервале температур, обеспечивающем высокую дисперсность, а следовательно, и высокую эффективность упрочняющих фаз [25].

Из анализа кривой изменения давления во времени следует (см. рис. 1), что время нарастания давления до 500 МПа должно составлять не более 14 с. В таких условиях фиксируется состояние металла, когда, с одной стороны, перегрев над линией ликвидус составляет ~200 К, а с другой — в твёрдом состоянии атомы теряют подвижность. Это состояние можно назвать квазитвёрдым. В таком состоянии атомы зафиксированы в тех положениях, в которых они находились до наложения давления, их диффузия затруднена, так как межузлия, вакансии, дислокации и другие дефекты упаковки атомов при достигнутой степени сжимаемости не обладают требуемой пропускной способностью [26]. В интервале 15...100 с протекает следующая стадия, которая связана с дальнейшим сближением атомов в условиях снижения температуры. Когда температура в тепловом центре заготовки достигнет значения ниже линии солидус на 50...100 К, давление сбрасывается, а прессующие плунжеры отводят в исходное положение.

Получение высоких механических свойств под влиянием программного наложения давления может быть связано, прежде всего, с уплотнением металла в местах расположения микропор, микрорыхлот, а также с опрессовкой межзёренных границ [27]. Повышение физико-механических свойств обеспечивается за счёт организации более сильных и эффективных межатомных связей. В условиях всестороннего сжатия предполагается компактировать атомы таким образом, чтобы формировались ассоциативные группы из нескольких атомов — кластеров, имеющих кристаллическую структуру [28].

Заключение. Результаты исследований показывают, что применение адаптивной системы управления с эталонной моделью для управления процессом обработки жидкого металла давлением обеспечивает повышение механических свойств и формирование структуры металла, близкой к структуре заготовки из проката.

Из сказанного следует, что процесс управления формированием свойств металла по заранее заданному закону решает проблему сближения атомов и формирования структуры металла или сплава до того, как произойдет кристаллизация. Такой эффект достигается при условии, когда во время охлаждения, в результате возможного протекания диффузионных процессов атомы не восстанавливают кристаллическую решётку. Диффузия атомов — процесс термокинетический, поэтому для сохранения полученного эффекта интервал температур (от температуры компактирования атомов до комнатной температуры) необходимо пройти за короткое время. В этой связи одной из задач дальнейшего совершенствования системы управления процессом является замедление движения атомов в указанном интервале температур при скоростях охлаждения, характерных для реальных технологических процессов. Использование предлагаемой технологии обеспечивает возможность в комплексе решать вопросы оптимизации параметров технологии и достижения требуемого сочетания физико-механических свойств алюминиевых сплавов и изделий из них.

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

1. Для того чтобы гарантированно создать квазитвёрдое состояние, давление $P = 400$ МПа нужно накладывать в течение 3 с, т. е. со скоростью $v = 130$ МПа/с. В дальнейшем давление необходимо повышать до 500 МПа в течение 7 с, металл выдерживать под давлением до момента, когда температура не понизится ниже линии солидус на 50...100 К.

2. Высокая скорость наложения давления на жидкий металл может быть использована для формирования однородной структуры в массивных стенках отливок и для достижения более высоких физико-механических свойств по сравнению с традиционными технологиями.

3. Использование адаптивной системы управления с эталонной моделью для управ-

ления сложными технологическими процессами позволяет в определённой степени решать задачи получения деталей с заранее заданными свойствами.

Библиографические ссылки

1. **Atkinson H.V.** Modelling the semisolid processing of metallic alloys // Progress in Materials Science. 2005. Vol. 50. P. 341—412.

2. **Семёнов Б.И., Бочаров Ю.Ф., Куштаров К.М.** и др. Современные технологии формообразования в твёрдожидком состоянии // КШПОМД. 2006. № 10. С. 3—14; № 11. С. 3—13.

3. **Семёнов Б.И., Куштаров К.М.** Современные тенденции совершенствования технологий заготовительных производств // Металлургия машиностроения. 2003. № 2. С. 29—40; № 4. С. 26—31.

4. **Семёнов Б.И., Мельников Н.А.** Принципы и техпроцессы получения точных заготовок из сплавов, находящихся в твёрдожидком состоянии // Металлургия машиностроения. 2001. № 1. С. 36—43.

5. **Fan Z.** Semisolid Metal Processing // Int. Mater. Rev. 2002. Vol. 47. P. 49—85.

6. **Flemings M.C.** Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State // Metallurgical Transactions A. 1991. Vol. 22A. P. 957—981.

7. **Денисов М.С.** Разработка управляющей программы для процесса опрессовки поршней двигателей внутреннего сгорания // Computational Nanotechnology. 2015. № 2. С. 46—50.

8. **Денисов М.С.** Разработка компьютерной системы управления процессом литья с кристаллизацией под давлением // Computational Nanotechnology. 2016. № 2. С. 146—152.

9. **Коростелёв В.Ф., Денисов М.С.** Разработка процесса литья для штампованных заготовок поршней автомобильных форсированных двигателей // Металловедение и термическая обработка. 2016. № 9. С. 58, 59.

10. **Коростелёв В.Ф., Хромова Л.П., Денисов М.С.** Исследование зависимости свойств сплава В95 от величины давления, накладываемого на кристаллизующийся металл // Металловедение и термическая обработка. 2017. № 2. С. 13—18.

11. **Коростелёв В.Ф., Денисов М.С.** Влияние скорости наложения давления на структуру и механические свойства алюминия А99 // Технология металлов. 2017. № 1. С. 2—7.

12. **Денисов М.С., Коростелёв В.Ф.** Разработка процесса опрессовки жидкого металла с ускоренным охлаждением // Матер. 13-й междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы науки XXI века». Москва, 31 авг. 2016.

13. **Денисов М.С.** Разработка технологии формирования квазикристаллической структуры алюминиевых сплавов методом литья с кристаллизацией под давлением // Матер. 6-й междунар. конф. «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества». Суздаль, 3—7 окт. 2016.

14. **Денисов М.С.** Обоснование режимов обработки алюминиевых сплавов давлением в процессе их кристаллизации // Матер. 13-й рос. ежегодной конф. молодых науч. сотр. и аспирантов «Физика-химия и технология неорганических материалов». Москва, 18—21 окт. 2016.

15. **Баландин Г.Ф.** Теория формирования отливки: Основы тепловой теории. Затвердевание и охлаждение отливки: учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998.

16. **Макаров Г.С.** Формообразование сплавов в твёрдожидком состоянии // Технология лёгких сплавов. 1996. № 5. С. 37—45.

17. **Пикунов М.В.** Плавка металлов, кристаллизация сплавов, затвердевание отливок: учеб. пособие для вузов. М.: МИСиС, 2005. С. 256.

18. **Семёнов Б.И.** Интеллектуализация промышленных технологий заготовительных производств на основе принципов синергетики // Заготовительные производства в машиностроении. 2003. № 7. С. 3—12.

19. **Денисов М.С.** Литьё с кристаллизацией под давлением как способ получения металлических заготовок с элементами наноструктуры // Матер. 6-й всерос. конф. по наноматериалам с элементами научной школы для молодёжи «НАНО-2016». Москва, 22—25 нояб. 2016.

20. **Денисов М.С.** Разработка технологии опрессовки алюминиевых сплавов для перспективных отраслей машиностроения // Матер. 9-й междунар. конф. ФППК-2016, посвящённой памяти акад. Г.В. Курдюмова, и 2-й всерос. молодёжной школы «Структура и свойства перспективных материалов». Черноголовка, 7—11 нояб. 2016.

21. **Коростелёв В.Ф., Денисов М.С.** Задачи теоретических и экспериментальных исследований процесса кристаллизации металлов и сплавов // Матер. 7-й междунар. науч.-практ. конф. «Теория и практика современной науки». Москва, 3—4 окт. 2012.

22. **Денисов М.С.** Исследование процессов сжимаемости алюминиевых сплавов в процессе наложения давления на кристаллизующийся металл // Матер. 11-й междунар. конг. «Машины, технологии, материалы». Варна, Болгария, 17—20 сент. 2014.

23. **Ким Д.П.** Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. М.: Физматлит, 2004. 464 с.

24. **Пилипенко А.В.** Адаптивная система управления нестационарным технологическим процессом формоизменения // Информационные системы и технологии. 2011. № 4/46. С. 115—119.

25. **Антонов Н.В., Терехов В.А., Тюкин И.Ю.** Адаптивное управление в технических системах: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербург. гос. у-та, 2001. 244 с.

26. **Черняков А.А., Даршт Я.А.** Моделирование многомассовых гидромеханических систем // Вестник машиностроения. 2011. № 1; № 4. С. 18—21.

27. **Пилипенко А.В., Абашин В.Г., Пилипенко А.П.** Исследование и модернизация математической модели работы гидропрессового оборудования // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. № 8. С. 26—33.

28. **Даршт Я.А.** Имитационное моделирование гидроаппаратов // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Гидромашиностроение. Настоящее и будущее». Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. С. 28—29.

УДК 681.51

Е.А. Микрин, д-р техн. наук, акад. РАН, **М.В. Комаров,** канд. техн. наук,
Н.Е. Зубов, д-р техн. наук, **В.Н. Рябченко,** д-р техн. наук
(ПАО РКК «Энергия», Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана)

Nikolay.Zubov@rsce.ru

ЛЕНТОЧНЫЕ КРИТЕРИИ СТАБИЛИЗИРУЕМОСТИ И ДЕТЕКТИРУЕМОСТИ МНОГОМЕРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Сформулированы новые критерии стабилизируемости и детектируемости линейной стационарной многомерной динамической системы. Критерии основаны на вычислении ранга блочно-ленточных матриц специфической структуры.

Ключевые слова: критерий управляемости; критерий наблюдаемости; линейные многомерные системы.

New criteria for the stability and detectability of a linear stationary multidimensional dynamical system are formulated. The criteria are based on calculating the rank of block-tape matrices with a specific structure.

Keywords: controllability criterion; observability criterion; linear multidimensional systems.

Введение. Понятие стабилизируемости или управляемости по выходу стационарной многомерной динамической системы [1—7] является важнейшим в теории и практике синтеза законов управления с обратной связью. Рассмотрим линейную динамическую систему следующего вида:

$$\dot{x}(t) = A\,x(t) + B\,u(t);\qquad y(t) = Cx(t), \tag{1}$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ — вектор состояний; $y \in \mathbb{R}^m$ — вектор выхода; $u \in \mathbb{R}^r$ — вектор входа, который в разных источниках имеет различное значение [1—3].

В данной работе будем придерживаться толкования понятия стабилизируемости системы, приведённого в работе [1].

Для системы (1) определим две области на комплексной плоскости ($\mathbb{C}$ — область устойчивости $\mathbb{C}^-$ и область неустойчивости $\mathbb{C}^+$):

$$\mathbb{C}^- \triangleq \{\lambda_i : \operatorname{Re}\lambda_i < 0\};\ \mathbb{C}^+ \triangleq \{\lambda_j : \operatorname{Re}\lambda_j \geqslant 0\}. \tag{2}$$

Будем называть систему (1) стабилизируемой, если существует такая обратная связь

$$u(t) = -KCx(t), \tag{3}$$

что собственные значения матрицы $\operatorname{eig}(A - BKC)$ удовлетворяют включению

$$\operatorname{eig}(A - BKC) \subset \mathbb{C}^-. \tag{4}$$

Далее без ограничения общности будем считать, что B и C в системе (1) — матрицы полного ранга.

Если «каждый нежелательный (неустойчивый) режим отображения A либо является управляемым (и, следовательно, может быть скорректирован за счёт сдвига соответствующего полюса), либо не является наблюдаемым через посредство имеющегося выходного сигнала» [1], алгебраический критерий стабилизируемости линейной непрерывной системы при условии, что $r = \operatorname{rank} B$, а $m = \operatorname{rank} C$ и при этом $r + m \geqslant n + 1$, может быть сформулирован в виде следующей леммы.

Лемма [1]. *Система* (1) *обладает свойством стабилизируемости почти для всех матриц A, B и C тогда и только тогда, когда ранг блочной матрицы*

$$S = (CB \mid CAB \mid CA^2B \mid \ldots \mid CA^{n-r}B) \tag{5}$$

равен

$$m = \operatorname{rank} C. \tag{6}$$

Если сравнить матрицу (5) с матрицами известных критериев управляемости и наблюдаемости Р. Калмана [1, 2, 4], то она оказывается своеобразным «объединением» этих критериев.

Таким образом, для управляемости по выходу системы (1) оказывается необходимым, чтобы выполнялось условие

$$\operatorname{rank}(CB \mid CAB \mid CA^2B \mid \ldots \mid CA^{n-r}B) = m. \quad (7)$$

То есть ранг блочной матрицы

$$(CB \mid -CAB \mid CA^2B \mid \ldots \mid CA^{n-r}B),$$

где у матрицы A^{n-r} степень определяется разностью между размерностью вектора состояния системы и размерностью вектора входа, должен быть равен размерности вектора выхода.

Ленточная матрица и критерий стабилизируемости. Матрицу (5) можно назвать *матрицей стабилизируемости* или *матрицей управляемости по выходу* системы (1). Представим эту матрицу в эквивалентном виде

$$\left(C \mid 0 \mid 0 \mid \cdots \mid 0\right)\begin{pmatrix} I_n & A & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & I_n & A & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & I_n & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & A \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & I_n \end{pmatrix}^{-1} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} B & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & B & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & B & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & B \end{pmatrix} = S, \quad (8)$$

где I_n — единичная матрица порядка n.

Путём раскрытия произведения матриц в левой части матрицы (8) можно непосредственно убедиться в справедливости данной формулы, т. е. в эквивалентности (5) и (8).

Число блочных строк в обращаемой матрице

$$\begin{pmatrix} I_n & A & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & I_n & A & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & I_n & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & A \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & I_n \end{pmatrix}^{-1}$$

из матрицы (8) равно $n - r$.

Введём обозначения для блочных матриц, фигурирующих в матрице (8),

$$\beta = \left(C \mid 0 \mid 0 \mid \cdots \mid 0\right), \quad (9)$$

$$\Omega = \begin{pmatrix} I_n & A & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & I_n & A & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & I_n & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & A \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & I_n \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\alpha = \begin{pmatrix} B & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & B & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & B & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & B \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Предположим, что система (1) не может быть стабилизирована с помощью обратной связи (3). Следовательно, матрица (8) должна иметь неполный ранг (в данном случае — по строкам). Используя понятие нетривиального (ненулевого) решения однородного уравнения, можно сформировать уравнение, характеризующее отсутствие этого свойства (стабилизируемости) у системы (1), а именно

$$X(CB \mid CAB \mid CA^2B \mid \ldots \mid CA^{n-r}B) = 0. \quad (12)$$

Если нетривиальное (ненулевое) решение уравнения (12) относительно неизвестной матрицы X существует, то система не обладает свойством стабилизируемости, если же не существует — обладает.

Учитывая представление матрицы (8), перепишем уравнение (12) в виде

$$X\left(C \mid 0 \mid 0 \mid \cdots \mid 0\right)\begin{pmatrix} I_n & A & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & I_n & A & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & I_n & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & A \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & I_n \end{pmatrix}^{-1} \times$$
$$\times \begin{pmatrix} B & 0 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & B & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & 0 & B & \ldots & 0 \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & B \end{pmatrix} = 0. \quad (13)$$

Далее используя обозначения (9)—(11), запишем уравнение (13) в следующем виде [4]:

$$X\beta\Omega^{-1}\alpha = 0 \quad (14)$$

или с учётом обратимости матрицы Ω (10) в виде

$$X\beta = \mu\alpha_L^{\perp}\Omega. \quad (15)$$

Здесь μ — некоторая подходящая матрица; $\alpha_L^{\perp}$ — левый делитель нуля максимального ранга матрицы α (11), т. е. матрицы, удовлетворяющей следующим условиям [4]:

$$\alpha_L^{\perp}\alpha = 0, \ \operatorname{rank}\alpha_L^{\perp} + \operatorname{rank}\alpha = (n - r + 1)n. \quad (16)$$

Условие разрешимости уравнений (14) и (15) относительно матрицы X выглядит следующим образом [4]:

$$\mu\alpha_L^{\perp}\Omega\beta_R^{\perp} = 0, \qquad (17)$$

где $\beta_R^{\perp}$ — правый делитель нуля максимального ранга матрицы β.

Матрица (9) удовлетворяет следующим условиям [5]:

$$\beta\beta_R^{\perp} = 0,\ \operatorname{rank}\beta_R^{\perp} + \operatorname{rank}\beta = (n - m + 1)n.$$

Решение уравнения (17) относительно μ нетривиально ($\mu \neq 0$), если выполняется тождество

$$(\mu\alpha_L^{\perp}\Omega\beta_R^{\perp})_L^{\perp} \neq 0, \qquad (18)$$

где $(\mu\alpha_L^{\perp}\Omega\beta_R^{\perp})_L^{\perp}$ — левый делитель нуля произведения матриц $\alpha_L^{\perp}\Omega\beta_R^{\perp}$.

В соответствии с выражениями (9)—(11) определим матрицы $\alpha_L^{\perp}$, $\beta_R^{\perp}$ и произведение $\alpha_L^{\perp}\Omega\beta_R^{\perp}$:

$$\alpha_L^{\perp} = \begin{pmatrix} B_L^{\perp} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_L^{\perp} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & B_L^{\perp} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & B_L^{\perp} \end{pmatrix};$$

$$\beta_R^{\perp} = \begin{pmatrix} C_R^{\perp} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_R^{\perp} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C_R^{\perp} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & C_R^{\perp} \end{pmatrix}; \qquad (19)$$

$$\alpha_L^{\perp}\Omega\beta_R^{\perp} = \begin{pmatrix} B_L^{\perp}C_R^{\perp} & B_L^{\perp}AC_R^{\perp} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_L^{\perp}C_R^{\perp} & B_L^{\perp}AC_R^{\perp} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & B_L^{\perp}C_R^{\perp} & B_L^{\perp}AC_R^{\perp} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_L^{\perp}C_R^{\perp} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & B_L^{\perp}C_R^{\perp} \end{pmatrix}. \qquad (20)$$

Здесь $B_L^{\perp}B = 0$ и $\operatorname{rank} B_L^{\perp} = n - r$, $CC_R^{\perp} = 0$ и $\operatorname{rank} C_R^{\perp} = n - m$, т. е. матрицы $B_L^{\perp}$ и $C_R^{\perp}$ также имеют максимальные ранги.

Вследствие того, что $\operatorname{rank} C \leqslant n$, в матрице (20) число строк всегда меньше числа столбцов.

Назовём выражение (20) *ленточной матрицей управляемости по выходу.*

На основе справедливости приведённых рассуждений сформулируем критерий, альтернативный критерию (7).

Теорема 1. *Система* (1) *стабилизируема почти для всех матриц A, B и C тогда и только тогда, когда ленточная матрица*

$$\boldsymbol{S}_{\text{лент}} = \begin{pmatrix} B_L^{\perp}C_R^{\perp} & B_L^{\perp}AC_R^{\perp} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_L^{\perp}C_R^{\perp} & B_L^{\perp}AC_R^{\perp} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & B_L^{\perp}C_R^{\perp} & B_L^{\perp}AC_R^{\perp} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B_L^{\perp}C_R^{\perp} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & B_L^{\perp}C_R^{\perp} \end{pmatrix} \qquad (21)$$

размера $(n - r)n \times (n - m)n$ *имеет полный ранг по строкам, т. е.*

$$\operatorname{rank} \boldsymbol{S}_{\text{лент}} = (n - r)n. \qquad (22)$$

Итак, система (1) является почти стабилизируемой тогда и только тогда, когда ранг ленточной матрицы стабилизируемости $\boldsymbol{S}_{\text{лент}}$ (21) равен произведению размерности вектора состояния на разность размерностей вектора состояния и входа системы.

Пример анализа стабилизируемости. В качестве примера рассмотрим числовые примеры и систему, которая в терминах пространства состояний представляется матрицами

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix};\ C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix};\ B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \qquad (23)$$

Пусть требуется определить стабилизируемость (23) или, другими словами, управляемость этой системы по выходу

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = x_1 + x_2. \qquad (24)$$

Вычислим делители нуля $B_L^{\perp}$ и $C_R^{\perp}$ для матриц (23):

$$B_L^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};\ C_R^{\perp} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \qquad (25)$$

Формируя ленточную матрицу стабилизируемости (21), получим

$$\boldsymbol{S}_{\text{лент}} = \begin{pmatrix} B_L^{\perp}C_R^{\perp} & B_L^{\perp}AC_R^{\perp} & 0 \\ 0 & B_L^{\perp}C_R^{\perp} & B_L^{\perp}AC_R^{\perp} \\ 0 & 0 & B_L^{\perp}C_R^{\perp} \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{c|c|c} \begin{pmatrix}0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0&1&0\\1&1&0\\1&0&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} & 0 \\ \hline 0 & \begin{pmatrix}0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} & \begin{pmatrix}0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0&1&0\\1&1&0\\1&0&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} \\ \hline 0 & 0 & \begin{pmatrix}0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0\\0\\1\end{pmatrix} \end{array}\right) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Очевидно, что

$$\operatorname{rank}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 3 = (3-2)\cdot 3, \quad (27)$$

и, следовательно, система (23) может быть стабилизируемой.

Ленточная матрица и критерий детектируемости. Далее рассмотрим ленточный критерий детектируемости системы (1). Заметим, что детектируемость является более слабым критерием, чем наблюдаемость, и означает существование возможности наблюдения всех неустойчивых режимов системы (1) [1].

В силу двойственности понятий стабилизируемости и детектируемости [1] сформулируем без доказательства теорему о ленточном критерии детектируемости стационарной многомерной динамической системы (1).

Определение. *Ленточную матрицу*

$$\boldsymbol{D}_{\text{лент}} = \left(\begin{array}{c|c|c|c|c|c} C_R^{\perp\mathrm{T}}B_L^{\perp\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline B_L^{\perp\mathrm{T}}A^{\mathrm{T}}C_R^{\perp\mathrm{T}} & C_R^{\perp\mathrm{T}}B_L^{\perp\mathrm{T}} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & B_L^{\perp\mathrm{T}}A^{\mathrm{T}}C_R^{\perp\mathrm{T}} & C_R^{\perp\mathrm{T}}B_L^{\perp\mathrm{T}} & 0 & \dots & 0 \\ \hline 0 & 0 & B_L^{\perp\mathrm{T}}A^{\mathrm{T}}C_R^{\perp\mathrm{T}} & C_R^{\perp\mathrm{T}}B_L^{\perp\mathrm{T}} & \dots & 0 \\ \hline \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & C_R^{\perp\mathrm{T}}B_L^{\perp\mathrm{T}} \end{array}\right) \quad (28)$$

будем называть ленточной матрицей детектируемости.

Теорема 2. *Система* (1) *детектируема почти для всех матриц A, B и C тогда и только тогда, когда ленточная матрица* (28) *размера* $(n-m)n \times (n-r)n$ *имеет полный ранг по строкам, т. е.*

$$\operatorname{rank} \boldsymbol{D}_{\text{лент}} = (n-m)n. \quad (29)$$

Итак, система (1) является детектируемой тогда и только тогда, когда ранг ленточной матрицы детектируемости $\boldsymbol{D}_{\text{лент}}$ (28) равен произведению (29), т. е. произведению размерности вектора состояния на разность размерностей вектора состояния и выхода системы.

Заключение. Таким образом, в данной работе сформулированы критерии стабилизируемости и детектируемости линейной стационарной многомерной динамической системы в терминах блочно-ленточных матриц специфической структуры. Одним из условий стабилизируемости и детектируемости в данном случае является полнота ранга по строкам соответствующих матриц.

Библиографические ссылки

1. **Справочник** по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987.
2. **Поляк Б.Т., Щербаков П.С.** Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
3. **Зубов Н.Е., Зыбин Е.Ю., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Пролетарский А.В., Рябченко В.Н.** Управление по выходу спектром движения космического аппарата // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 4. С. 111—122.
4. **Мисриханов М.Ш.** Инвариантное управление многомерными системами. Алгебраический подход. М.: Наука, 2007.
5. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
6. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** и др. Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ. Приборостроение. 2014. № 5. С. 3—15.
7. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Управление по выходу спектром дескрипторной динамической системы // Доклады Академии наук. 2016. Т. 468. № 2. С. 134—136.

УДК 629.735.33.015.4:539.43

О.В. Павленко, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., **Е.А. Пигусов,** мл. науч. сотр.
(Центральный аэрогидродинамический институт, г. Жуковский)

evgeniy.pigusov@tsagi.ru

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБТЕКАНИЯ ОТСЕКА КРЫЛА С СИСТЕМОЙ ТАНГЕНЦИАЛЬНОГО ВЫДУВА СТРУИ НА ЗАКРЫЛОК

Рассмотрена задача численного моделирования тангенциального выдува высокоскоростной струи на поворотный нещелевой закрылок для подавления отрыва потока. Целью моделирования являлось исследование особенностей обтекания отсека крыла с системой тангенциального выдува струи на закрылок с учётом влияния стенок рабочей части аэродинамической трубы. Численное исследование проведено с использованием программы ANSYS FLUENT (лицензия № 501024), основанной на решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса. Для оценки достоверности полученных результатов проведена валидация с использованием результатов экспериментальных исследований.

Ключевые слова: численное моделирование; тангенциальный выдув струи; поворотный нещелевой закрылок; взлётно-посадочная механизация; аэродинамическая труба; валидация.

The problem of numerical modeling of the tangential blowing of a high-speed jet onto a spinning non-slit wing flap for suppressing flow separation is considered. The simulation aim was to study the flow around the wing compartment with the jet tangential blowing onto the wing flap, taking into account the influence of the walls of the working part of the wind tunnel. The numerical study was carried out using the ANSYS FLUENT program (license No. 501024), based on the solution of the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations. To assess the reliability of the results obtained, Validation for evaluation of the obtained results reliability was performed using the results of experimental studies.

Keywords: numerical modeling; tangential jet blowing; spinning non-slit wing flap; take-off mechanization; wind tunnel; validation.

За последние 50 лет в мире накоплен значительный опыт в изучении струйной аэродинамики крыльев. В основном это результаты экспериментальных исследований в аэродинамических трубах (АДТ), но с развитием компьютерных технологий увеличивается доля численных исследований.

Одним из эффективных способов повышения несущих свойств крыла на взлётно-посадочных режимах полёта является тангенциальный выдув струй сжатого воздуха на поверхность отклонённого закрылка [1]. Обеспечение повышенных несущих свойств крыла происходит за счёт ликвидации отрыва потока на отклонённом закрылке и увеличения циркуляции потока на крыле.

Основным параметром, характеризующим интенсивность выдува струй и его воздействия на изменение аэродинамических характеристик крыла, является коэффициент импульса C_μ, представляющий собой отношение импульса струи к скоростному напору набегающего потока и площади крыла S (или к хорде профиля b):

$$C_\mu = \frac{mV_j}{q_\infty S} = \frac{2\rho_j V_j^2 h_c}{\rho_\infty V_\infty^2 b}, \qquad (1)$$

где m — массовый расход выдуваемого воздуха; V_j, V_∞ — скорость воздуха в струе на срезе сопла и в набегающем потоке соответственно; ρ_j, ρ_∞ — плотность воздуха в струе на срезе сопла и в набегающем потоке соответственно; h_c — высота щелевого сопла; q_∞ — скоростной напор набегающего потока; b — хорда профиля.

Объектом исследования являлась модель отсека крыла, установленная между стенками закрытой рабочей части АДТ. Крыло выполнено с нещелевым закрылком, на который тангенциально выдувалась высоконапорная струя воздуха (рис. 1). Геометрические параметры модели и АДТ, а также экспериментальные данные приведены в работе [2]. В расчётах, как и в эксперименте, для профиля RAE-102

с выдувом на отклоняемый закрылок для двух углов отклонения закрылка ($\delta_з$ = 20°, 60°) и носка ($\delta_н$ = 0°, 30°) при числах Маха M ≈ 0,13 и Рейнольдса Re = $3{,}78 \cdot 10^6$ варьировался коэффициент импульса выдуваемой струи C_μ.

Построение расчётной сетки выполнено с использованием программы ANSYS ICEM CFD. Границы расчётной области расположены в соответствии с размерами рабочей части АДТ. Для моделирования следа возмущённого потока за крылом расчётная часть модели АДТ была продлена по оси X на 10,6 м (рис. 2).

Структурированная расчётная сетка содержит около 4,5 млн ячеек, а для расчёта пограничного слоя на крыле и стенках АДТ была построена специальная сетка o-grid (рис. 3).

Для того чтобы правильно смоделировать пограничный слой, высота первой ячейки сетки вблизи исследуемой поверхности выбиралась так, чтобы пограничный слой вместил достаточное количество ячеек для расчёта пристеночной функции

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_p}{\mu},$$

где u_τ — характерная скорость; y_p — дистанция от точки пространства до стенки профиля; ρ — плотность окружающей среды; μ — вязкость окружающей среды.

Расчётные сетки построены в программе ANSYS ICEM CFD в соответствии с требованиями программы расчёта так, что параметр $y^+ \leqslant 0{,}8$.

В выходном сечении щелевого сопла для тангенциального выдува струи задавалась скорость истечения газа из сопла, рассчитанная для данного значения коэффициента импульса струи C_μ, предполагая, что статическое давление в струе на срезе сопла соответствует статическому давлению набегающего потока.

Общая картина обтекания модели крыла с отклонённым на угол $\delta_з$ = 20° закрылком в рабочей части АДТ показана на рис. 4. Согласно приведённым картинам предельных линий тока, при отсутствии выдува струи (C_μ = 0, рис. 4, *а*) по всему размаху закрылка происходит отрыв потока, который усиливается в месте сочленения крыла со стенками АДТ. Это обстоятельство подтверждают также рассчитанные распределения скоростей в центральном сечении крыла и закрылка (рис. 5).

Выдув струи с коэффициентом импульса C_μ = 0,026 обеспечивает практически безотрыв-

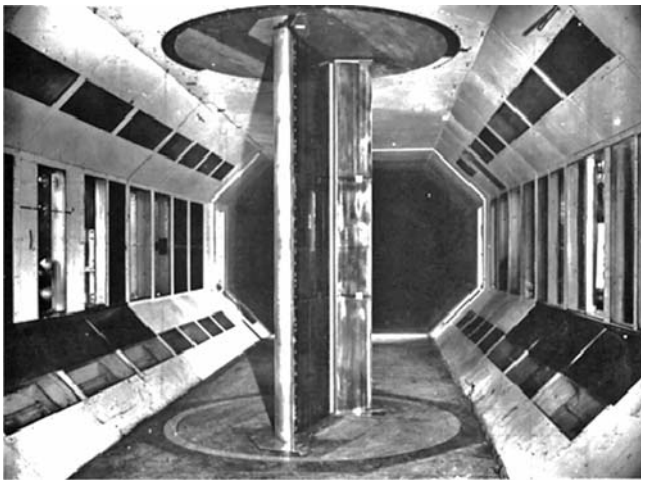


Рис. 1. Модель в рабочей части аэродинамической трубы

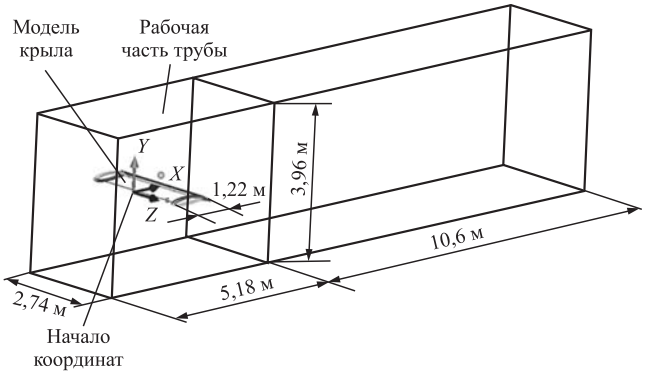


Рис. 2. Построение границ расчётной области

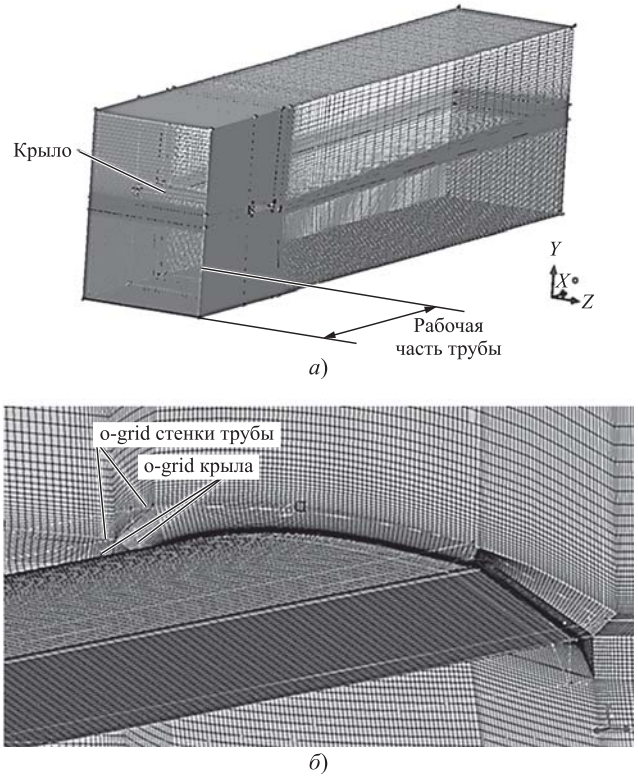
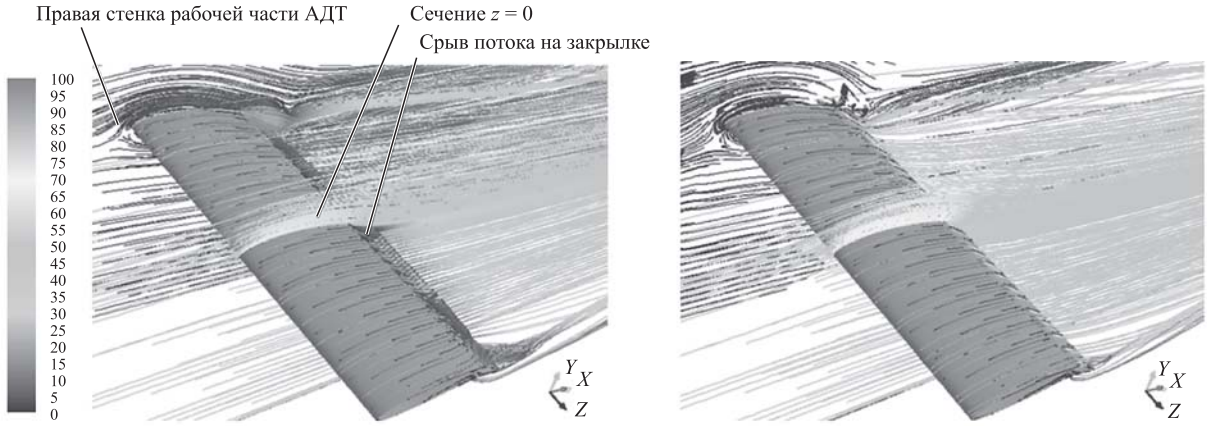


Рис. 3. Расчётная сетка:
а — общий вид; *б* — вблизи крыла, $\delta_з$ = 20°



а) *б*)

Рис. 4. Предельные линии тока в рабочей части аэродинамической трубы и в сечении крыла z = 0:
а — $C_\mu = 0$; *б* — $C_\mu = 0{,}026$

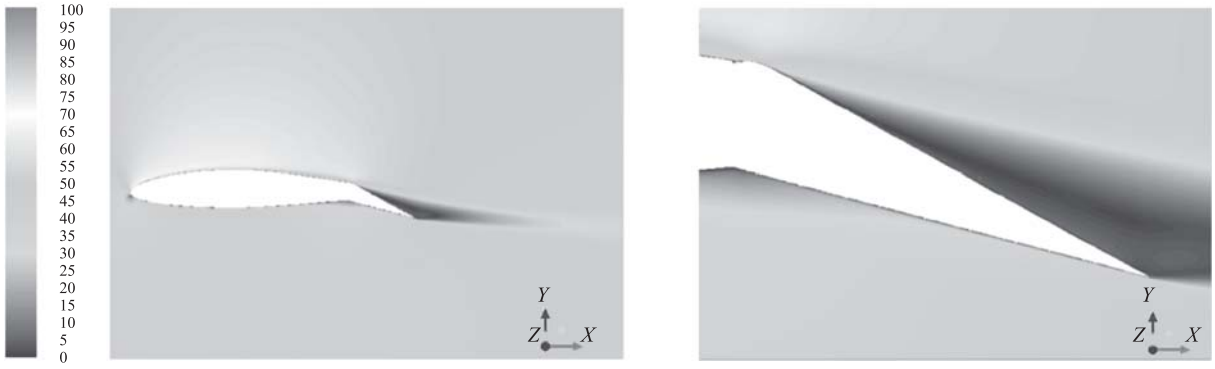


Рис. 5. Распределение скоростей в сечении крыла и закрылка, м/с (C_μ = 0)

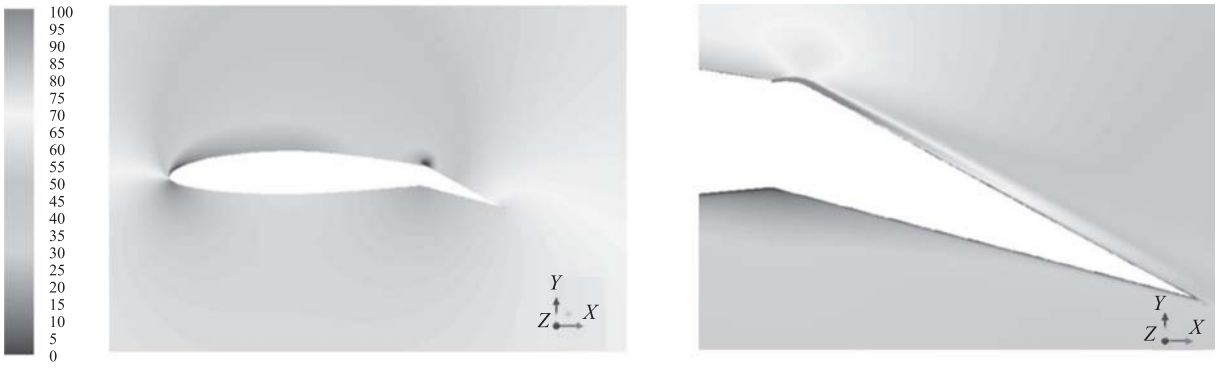


Рис. 6. Распределение скоростей, м/с (C_μ = 0,026)

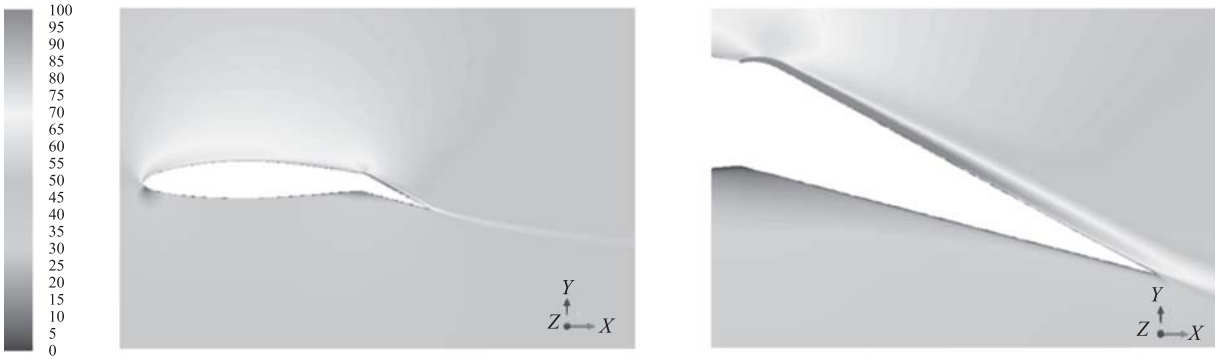


Рис. 7. Распределение скоростей, м/с (C_μ = 0,047)

ное обтекание закрылка (рис. 4, *б* и 6), а увеличение интенсивности выдува до C_μ = 0,047 приводит к существенному изменению поля течения вокруг крыла, вызванного наличием струйной поверхности, сходящей с задней кромки закрылка (рис. 7).

Валидация расчёта производилась путём сравнения результатов численных исследований с данными эксперимента. Сравнение величин распределения коэффициента давления в сечении z = 0 при интенсивности выдува на закрылок C_μ = 0,026 на угле атаки α = 0 показало хорошее согласование расчётных и экспериментальных данных (рис. 8).

Результаты расчёта коэффициентов подъёмной силы и момента тангажа хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 9 и 10). В соответствии с таким изменением нагрузки по крылу от интенсивности выдува на закрылок повышается коэффициент подъёмной силы крыла (см. рис. 9) и момент тангажа на пикирование относительно заданного центра масс (см. рис. 10).

Влияние интенсивности выдува струи на закрылок крыла с отклонённым носком на угол ($\delta_н$ = 30°) и закрылком ($\delta_з$ = 60°) показано на рис. 11. Приведённая на рис. 11, *а* картина обтекания показывает, что при отсутствии выдува позади закрылка имеется обширная область отрыва потока по всему размаху крыла. Однако, даже при сравнительно небольшой интенсивности выдува струи на закрылок (C_μ = 0,06) отрыв потока на основной части крыла практически ликвидируется, но сохраняются области отрыва потока в местах сочленения крыла со стенками АДТ (рис. 11, *б*). При увеличении коэффициента импульса струи до C_μ = 0,096 отрыв потока в указанных областях практически подавляется.

Более детальные картины обтекания крыла в его среднем сечении указывают на наличие областей возвратного течения, т. е. отрыва потока на закрылке без выдува (рис. 12), который эффективно подавляется за счёт выдува струи на закрылок (рис. 13 и 14).

При выдуве струи на закрылок с интенсивностью C_μ = 0,06 увеличиваются локальные зоны разрежения на верхней поверхности в месте соединения отклонённого носка с крылом, а также в районе выдува на закрылок (см. рис. 13). Верхняя поверхность крыла и закрылка обтекается практически безотрывно, однако позади закрылка имеется область возвратного течения — отсоединённого отрыва потока.

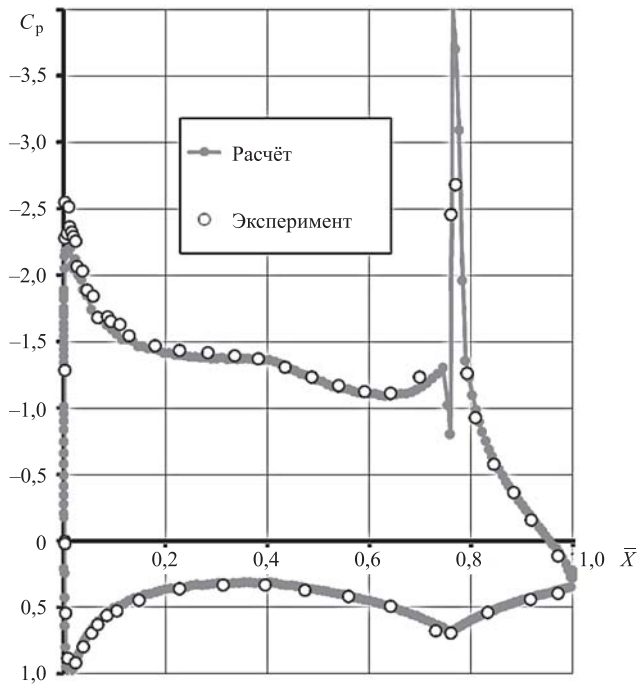


Рис. 8. Сравнение расчётных и экспериментальных данных распределения коэффициента давления (M = 0,13; Re = 3,7 млн; α = 0°; C_μ = 0,026)

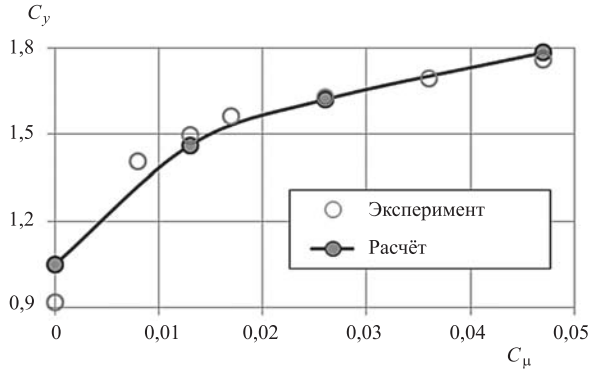


Рис. 9. Зависимость коэффициента подъёмной силы крыла от интенсивности выдува на закрылок (M = 0,13; Re = 3,7 млн; α = 0°)

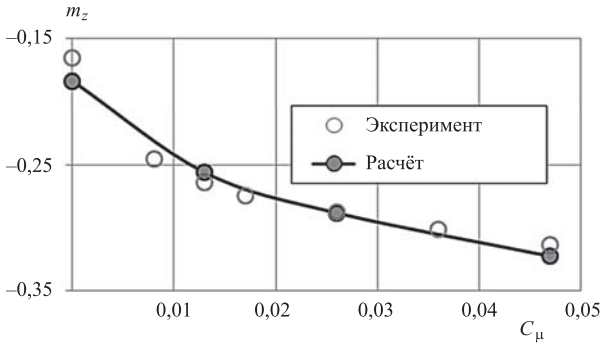


Рис. 10. Зависимость коэффициента момента тангажа крыла от интенсивности выдува на закрылок (M = 0,13; Re = 3,7 млн; α = 0°)

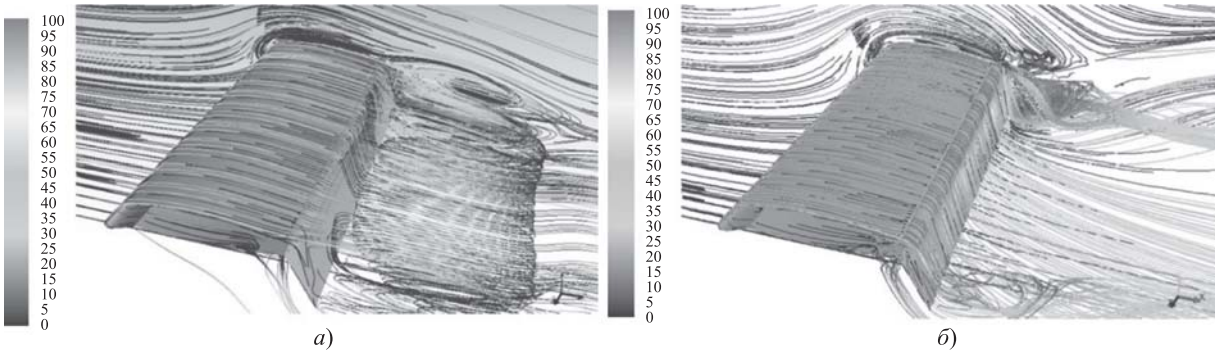


Рис. 11. Влияние интенсивности выдува струи на закрылок на обтекание крыла в посадочной конфигурации: *а* — $C_\mu = 0$; *б* — $C_\mu = 0{,}06$

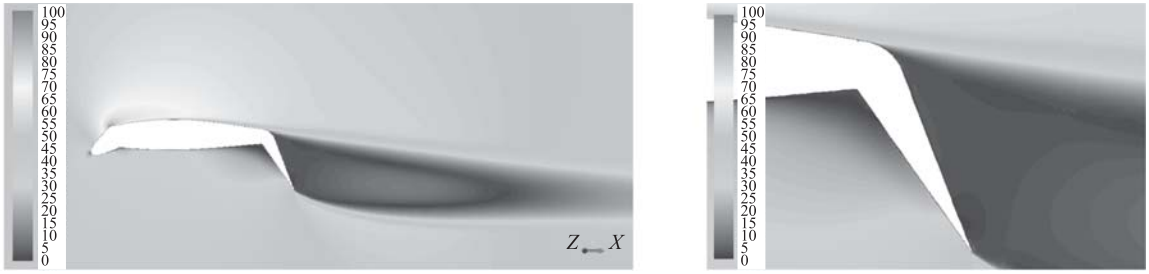


Рис. 12. Распределение скоростей в среднем сечении при отсутствии выдува струи

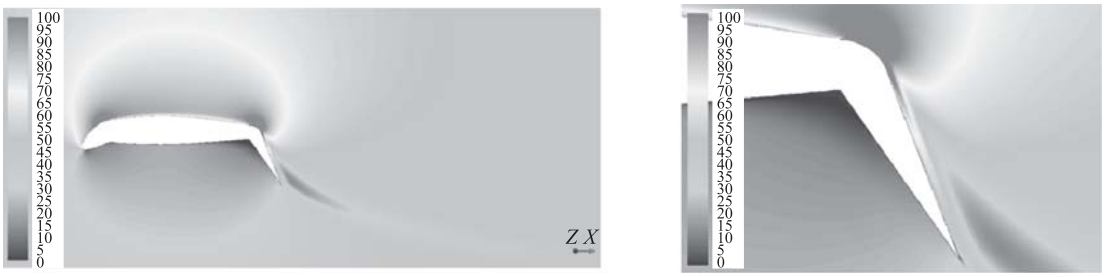


Рис. 13. Распределение скоростей в среднем сечении при выдуве струи на закрылок (C_μ = 0,06)

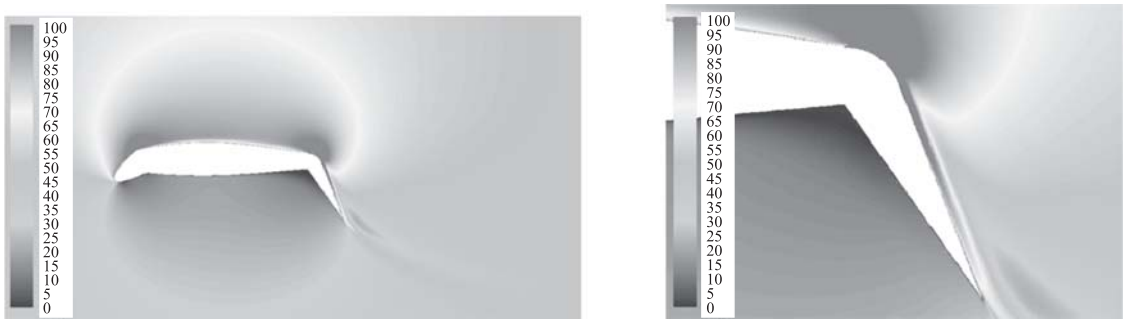


Рис. 14. Распределение скоростей в среднем сечении при выдуве струи на закрылок (C_μ = 0,096)

Увеличение интенсивности выдува до $C_\mu = 0{,}096$ на закрылок приводит к увеличению скорости течения на верхней поверхности в области сочленения отклонённого носка и крыла, а также на передней части закрылка (см. рис. 14). Зона разрежения на верхней поверхности закрылка захватывает только четверть его хорды в районе выдува. Выдув на закрылок с $C_\mu = 0{,}096$ увеличивает скорость потока над носовой частью закрылка и способствует уменьшению высоты отсоединённой отрывной зоны.

Сравнение величин распределения коэффициента давления в сечении $z = 0$ при ин-

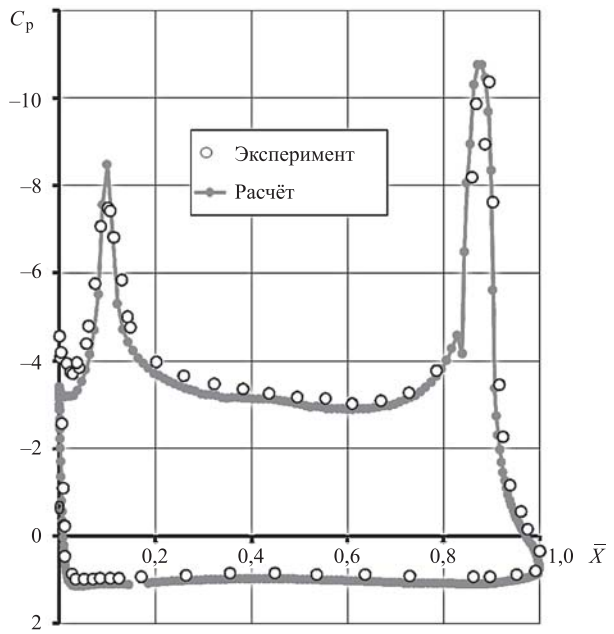


Рис. 15. Сравнение расчётных и экспериментальных данных распределения коэффициента давления (M = 0,13; Re = 3,7 млн; α = 0°; C_μ = 0,06)

тенсивности выдува на закрылок C_μ = 0,06 на угле атаки α = 0 показало хорошее согласование расчётных и экспериментальных данных (рис. 15).

В результате численных исследований показана удовлетворительная сходимость результатов расчёта с экспериментальными данными коэффициентов подъёмной силы, момента тангажа и распределения коэффициента давления по сечению профиля с отклонённым закрылком при углах его отклонения $\delta_з$ = 20° и 60°, а также изменения интенсивности выдува струи в исследованном диапазоне C_μ = 0...0,1.

Таким образом, получена пространственная картина обтекания отсека крыла с системой тангенциального выдува струи на закрылок с учётом влияния стенок рабочей части аэродинамической трубы. Выявлены особенности физической картины течения при подавлении отрыва потока на нещелевом закрылке и, в частности, наличие отсоединённого отрыва, который существует на некотором расстоянии позади закрылка в виде области возвратного течения над поверхностью закрылка и отделённого от неё слоем безотрывного течения.

Проведённое расчётное исследование дополнило экспериментальную информацию, позволило получить распределение давления по всей поверхности крыла и объёмную картину обтекания крыла с системой тангенциального выдува струи на закрылок, а также показало влияние на обтекание отсека крыла стенок аэродинамической трубы.

Библиографические ссылки

1. **Петров А.В.** Энергетические методы увеличения подъемной силы крыла. М.: Физматлит, 2011. 404 с.

2. **Lawford J.A., Foster D.N.** Low-Speed Wind-Tunnel Tests on a Wing Section with Plain Leading- and Trailing-Edge Flaps having Boundary-Layer Control by Blowing // Aeronautical research council reports and memoranda. 1970. No. 3639.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материалов из журнала «Автоматизация. Современные технологии» возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала.

При этом ссылка на журнал обязательна.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении,

а также непосредственно на сайте издательства «Инновационное машиностроение».

УДК 004.072

В.Г. Рябцев, д-р техн. наук, проф., **А.П. Евдокимов,** канд. техн. наук, доц.,
А.В. Меликов, канд. техн. наук
(Волгоградский государственный аграрный университет)
akim.onoke@mail.ru

МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ МИКРОСХЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ПАМЯТИ

Для проектирования цифровых систем, содержащих встроенную память, применяется интегрированная система, которая содержит базу программ тестов на проблемно ориентированном языке Prover, генератор тестов, модель алгоритмического генератора, транслятор программы тестов с Prover на VHDL-язык, систему Active-HDL и программу визуализации результатов моделирования. Интеграция программных средств позволяет снизить трудоёмкость синтеза и отладки программ тестов и в большинстве случаев автоматизировать проектные процедуры.

Ключевые слова: алгоритмический генератор; верификация; интегрированная система; модель микросхемы памяти; транслятор; проблемно ориентированный язык Prover.

For the design of digital systems containing built-in memory an integrated system is used. This system contains a database of test programs for the problem-oriented language Prover, a test generator, an algorithmic generator model, a test program translator from Prover to VHDL-language, an Active-HDL system and a visualization program of the modeling results. Integration of software allows reducing the complexity of synthesis and debugging of test programs and in most cases to automate design procedures.

Keywords: algorithmic generator; verification; integrated system; memory chip model; translator; problem-oriented language Prover.

Введение. Для повышения производительности вычислительных систем с микропроцессорами, быстродействие которых возрастает ежегодно, совершенствуются конструкции микросхем памяти. Для исследования режимов работы и изучения параметров новых типов микросхем памяти осуществляют верификацию их моделей, например, в системе Active-HDL [1]. Однако в свободном доступе изготовители микросхем памяти предлагают весьма ограниченный набор испытательных тестов. Сначала предлагается сформировать файл с векторами воздействий, затем записать его в модель микросхемы памяти, считывать реакции и сравнивать их с векторами массива воздействий [2]. Для микросхемы памяти ёмкостью 2М 36-разрядных слов требуется большой объём внешнего накопителя для хранения тестовых воздействий. В некоторых предлагаемых тестах не обеспечивается автоматическое сравнение считанных данных с их эталонными значениями, а заключение о корректности исследуемой модели можно сделать лишь по результатам визуальных наблюдений пользователя [3]. Отсутствие автоматической проверки корректности моделей приводит к ошибкам как в самих моделях, так и в испытательных тестах: неправильно формируются синхронизирующие сигналы, неверно указывается число столбцов запоминающих ячеек. Разработчики не могут детально исследовать последовательность команд, которую необходимо применить в вычислительной системе. Указанные проблемы затрудняют проектирование и отладку новых контроллеров памяти и не позволяют легко встраивать новые типы микросхем памяти в вычислительные комплексы.

Постановка задач. Целью работы является разработка методологии построения интегрированной системы для верификации моделей микросхем полупроводниковой памяти, чтобы обеспечить сокращение затрат времени на синтез программ тестов за счёт формирования их автоматизированно специальными программными средствами. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

разработать генератор программ тестов для микросхем памяти заданного объёма;

создать программную модель алгоритмического генератора, который будет применяться для верификации моделей микросхем памяти;

разработать средства трансляции программы тестов, составленных на проблемно ориентированном языке Prover, на VHDL-язык.

Модель микросхемы оперативной памяти. Неотъемлемой частью любой микропроцессорной системы является оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), в котором хранятся программы управления и данные, необходимые для обеспечения функционирования автоматизированной системы.

Самое простое ОЗУ имеет следующие входные сигналы:

шину адреса требуемой ширины, определяющую число ячеек памяти в запоминающем устройстве;

шину данных необходимой ширины, определяющую размер каждой ячейки памяти в битах;

сигнал выбора кристалла микросхемы, активное состояние которого означает, что выполняется считывание или запись;

сигнал активизации записи или считывания.

Описание модели устройства на языке VHDL состоит из двух обязательных частей: описания интерфейса и описания архитектуры. Описание интерфейса включает в себя перечисление входов и выходов устройства. Описание архитектуры модели включает в себя описание внутренних объектов, сигналов и её поведения [4]. Для одного и того же устройства можно описать несколько архитектур. Описание интерфейса осуществляется следующим участком кода:

```
entity Memory is
    port (
        nCS: in std_logic;
        nWR: in std_logic;
        ADDRESS: in std_logic_vector(addrBusWidth-1 downto 0);
        DATA: inout std_logic_vector(dataBusWidth-1 downto 0)
        );
    end Memory;
```

В описании интерфейса приняты специальные обозначения для сигналов: ширина шины адреса обозначена через AW (Address Width); ширина шины данных — DW (Data Width); выводы шины адреса — A_0, A_1, ..., A_{AW-1} (Address); выводы шины данных — D_0, D_1, ..., D_{DW-1} (Data); сигнал выбора кристалла — nCS (Chip Select); запись/считывание — nWR (WRite).

Описание архитектуры устройства раскрывает его поведение, которое должно быть таким, чтобы состояние шины данных изменялось каждый раз, когда изменяется какой-либо из входных сигналов. Если не производится ни считывание, ни запись, то выходы шины данных необходимо переключить в высокоимпедансное (третье) состояние:

```
architecture Memory of Memory is
    begin
    bus_cntr:
        process(DATA, ADDRESS, nCS, nWR)
        variable Memory: memType;
            begin
            if (nCS = '0') then
                if nWR = '1' then
                DATA < = Memory(std2int(ADDRESS));
            elsif nWR = '0' then
    Memory(std2int(ADDRESS)): = DATA;
    else
            DATA < = getStateVector('Z', dataBusWidth);
            end if;
        else
            DATA < = getStateVector('Z', dataBusWidth);
        end if;
        end process;
end Memory;
```

Данная модель синхронного запоминающего устройства содержит заданное число ячеек памяти с указанием размеров каждой ячейки. Модели большинства микросхем памяти в отличие от рассматриваемой модели в несколько раз сложнее и имеют множество временны́х параметров.Чаще всего именно несоблюдение этих временны́х характеристик обусловливает ошибки в моделях, что приводит к их непригодности для использования в составе других проектов.

Структура интегрированной системы для верификации моделей. Для разработки новых типов запоминающих устройств и верификации их моделей целесообразно применять интегрированную систему, содержащую базу шаблонов тестов для микросхемы памяти ёмкостью 256 бит, разработанных на Prover, генератор тестов, транслятор программ с Prover на VHDL-язык, модель алгоритмического генератора (АЛГ), Active-HDL и визуализатор полученных результатов [5]. Применение интегрированной системы позволит получить преимущества над аналогичными системами за счёт алгоритмического формирования тестов и автоматического сравнения считанных и эталонных данных. Структура интегрированной системы для верификации моделей микросхем памяти приведена на рис. 1. Исходными данными для формирования программы теста являются название теста и ёмкость исследуемой модели микросхемы памяти.

В базу шаблонов тестов для микросхемы памяти ёмкостью 256 байт входят программы следующих тестов: «march_A», «march_B»,

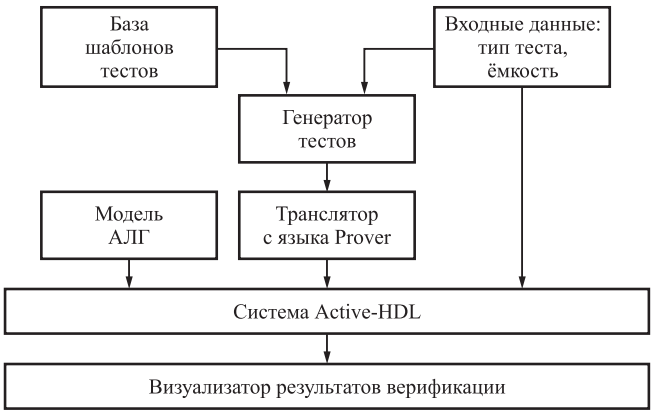


Рис. 1. Структура интегрированной системы

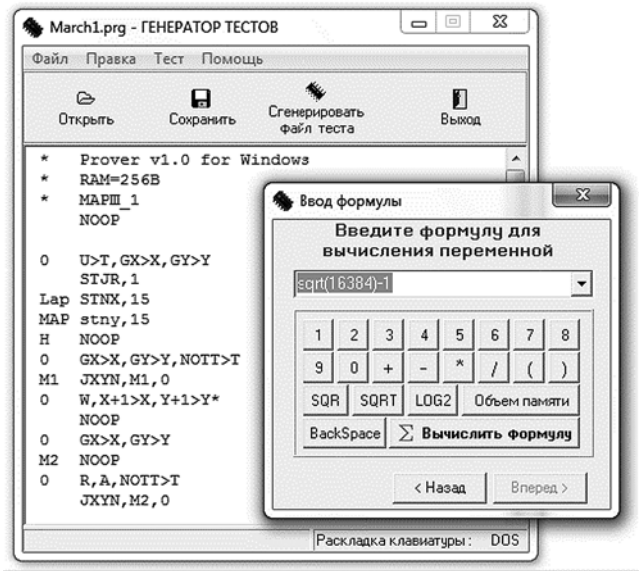


Рис. 2. Ввод формулы во встроенный калькулятор

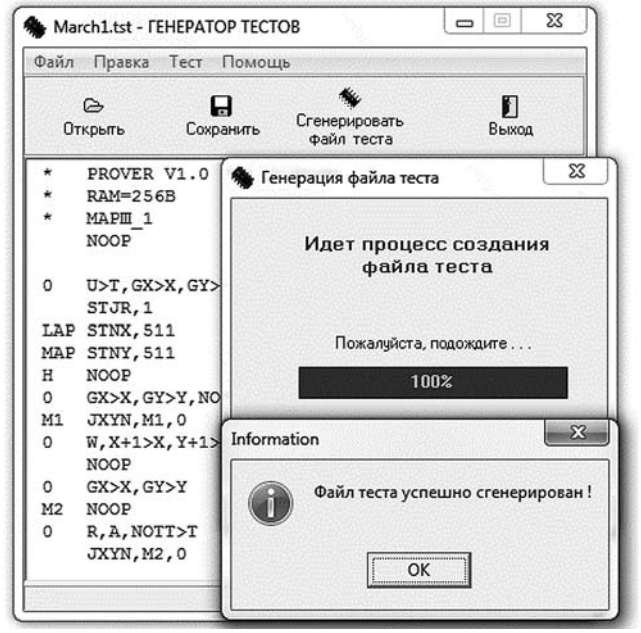


Рис. 3. Завершение процесса генерации программы теста

«march_C», «march_C-R», «march_G», «march_LA», «march_LR», «march_RAW», «march_SR», «march_SS», «march_U», «march_U-R», «march_UD», «march_Y», «MATS+», «MATS++», «PMOVI», «PMOVI-R», «HAMMER». Корректность данных программ проверена при выполнении данных тестов в интерпретирующей системе Prover в графическом режиме работы с визуализацией выполняемых операций [6].

Для генерации программ тестов для микросхем памяти, которые выпускаются промышленностью, необходимо по заданной ёмкости памяти при помощи встроенного калькулятора, внешний вид которого показан на рис. 2, осуществить вычисление значений переменных и произвести их замену в участках программы, указанных метками.

В программах тестов на языке Prover для микросхемы памяти базового объёма ёмкостью 256 байт установлена функциональная зависимость программных переменных от ёмкости тестируемой микросхемы.

В программах наиболее распространённых тестов объём диагностируемого изделия определяется по формуле

$$n = (NX - GX + 1) \times (NY - GY + 1),$$

где GX, GY — начальный адрес диагностируемого массива запоминающих элементов по координатам X и Y соответственно; NX, NY — конечный адрес диагностируемого массива запоминающих элементов по координатам X и Y соответственно.

По умолчанию GX = GY = 0, поэтому диагностируется весь объём микросхемы памяти. После замены базовых значений переменных на вычисленные генерируется программа теста на проблемно ориентированном языке Prover для микросхемы памяти заданного объёма. Сообщение «Файл теста успешно сгенерирован!» (рис. 3) означает завершение процесса генерации программы теста.

Трансляцию программ тестов, составленных с помощью Prover, на язык VHDL обеспечивает специализированный транслятор, главное окно которого показано на рис. 4. Транслятор представляет собой универсальную, модифицируемую систему. В её состав входят исполняемый модуль, файл описания трансляции команд из одного языка в другой и файл шаблона теста для среды Active-HDL [7].

Файл описания трансляции TranslatorToVHDL.pdh содержит описание

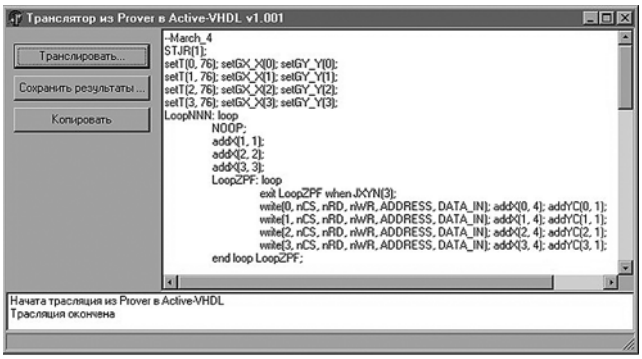


Рис. 4. Главное окно транслятора с Prover на VHDL-язык

соответствия команд Prover и модели памяти в Active-VHDL. В этом файле команды задаются в такой форме:

P|Prover_commands = Active-HDL_commands,

где P — приоритет; Prover_commands — команда Prover; Active-HDL_commands — команда Active-HDL.

Также используются вспомогательные конструкции — макроподстановки и комментарии. Строка, которая начинается символом «//», воспринимается как комментарий и игнорируется до конца. Примеры замены команд Prover на операнды языка VHDL:

1|STCR,<N> = STCR(<N>); 2|GX>X = setGX_X(<F>).

Файл шаблона транслятора TranslatorToVHDL.mdh содержит шаблон будущего теста, который объединяется с полученной в результате трансляции программой. Получается готовый тест для верификации моделей микросхем памяти в системе Active-HDL, где выполняется верификация модели микросхемы памяти при помощи выбранного теста с применением процедур алгоритмического генератора. Визуализация результатов моделирования обеспечивается при помощи специального инструментального средства.

Визуализация результатов моделирования. Для наблюдения и анализа тестовых последовательностей большой длины предлагается сформировать дополнительный файл отчёта о результатах моделирования, в который записываются коды адреса, данных и выполняемых операций. В дальнейшем полученный отчёт можно интерпретировать при помощи специальной программы и представить результаты в графическом виде [8, 9].

Главное окно программы интерпретации, визуализации и анализа (ИВА) результатов моделирования приведено на рис. 5. По командам программы ИВА можно открывать файлы с расширением «hpr», содержащие результаты моделирования, устанавливать задержку выдачи результатов моделирования на экран монитора.

Текущие значения кода адреса запоминающих ячеек, коды эталонных и считанных данных, результаты их сравнения, а также основные операции процесса верификации VHDL-модели микросхемы памяти заносятся в отдельный файл отчёта report.hpr [10—12]. Данные этого файла фактически представляют собой память следа, который формируется в процессе верификации. В данную память заносятся параметры и операции верификации модели в виде следующего кортежа:

$$K = \langle C, A, T, MEM, E \rangle,$$

где C — коды операций обращения к модели и операции разрешения сравнения данных; A — текущие значения кода адреса выбранных запоминающих ячеек; T, MEM — коды эталонных и считанных данных соответственно; E — флаг ошибки, полученный при несовпадении кодов считанных и эталонных данных.

Данные сведения получаются с помощью специальной функции, встраиваемой в процедуры обращения к модели микросхемы памяти. Во время выполнения процедуры записи (W) фиксируются текущие значения кода адреса ячеек, код эталонных данных T; в процедуре считывания — код операции считывания (R), текущие значения кода адреса ячеек и кода считанных данных (MEM). В процеду-

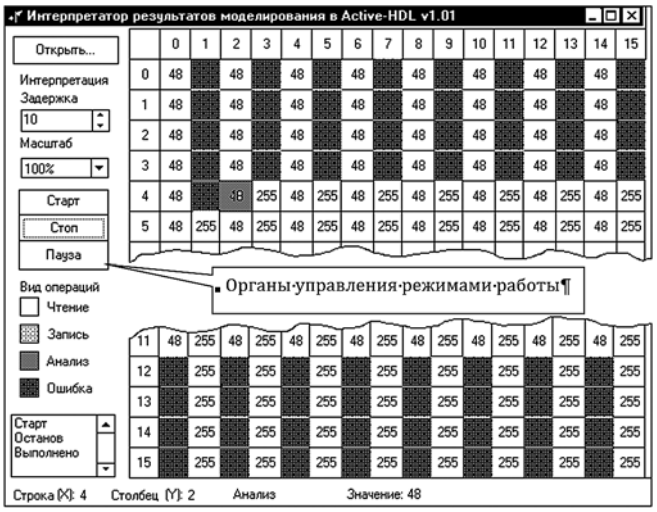


Рис. 5. Визуализация результатов моделирования

ре сравнения считанных и эталонных данных при их несовпадении дополнительно формируется флаг ошибки E. По состоянию данного флага можно обнаружить и устранить ошибку в модели запоминающего устройства или в программе теста, который применяется для верификации данной модели.

Кнопки управления режимом работы позволяют запускать программу (кнопка «Старт»), останавливать процесс выполнения программы (кнопка «Пауза») и прекращать её выполнение (кнопка «Стоп»). Графическая интерпретация результатов моделирования обеспечивает наглядность процесса верификации модели проектируемого изделия и позволяет снизить трудоёмкость отладки программ модели и теста.

Перспективы внедрения и развития системы. Для верификации VHDL-моделей микросхем памяти DDR-типа алгоритмический генератор интегрированной системы доработан для формирования тестовых наборов для нескольких смежных тактов за счёт применения мультипроцессорной структуры. При использовании параллельной обработки данных вектор воздействий V образует кортеж V = <C, A, T>, содержащий вектор кодов операций C, вектор кодов адреса A, вектор кодов данных T. Векторы кодов адреса и данных формируются операционными процессорами, число которых (p) равно коэффициенту распараллеливания операций. Таким образом, тестовые воздействия образуют матрицу

$$M_v = \begin{bmatrix} C_0 & A_0 & T_0 \\ C_1 & A_1 & T_1 \\ & \dots & \\ C_{p-1} & A_{p-1} & T_{p-1} \end{bmatrix}.$$

Для обработки ответных реакций предлагается использовать p схем сравнения считанных и эталонных данных. При этом формируется вектор результатов сравнения

$$E = \begin{bmatrix} D_0 \oplus T_0 \\ D_1 \oplus T_1 \\ \dots \\ D_{p-1} \oplus T_{p-1} \end{bmatrix}.$$

Результаты сравнения считанных и эталонных данных формируют флаг ошибки, который вычисляется по формуле $\text{Error_flag} = \bigvee_{i=0}^{p-1} E_i$.

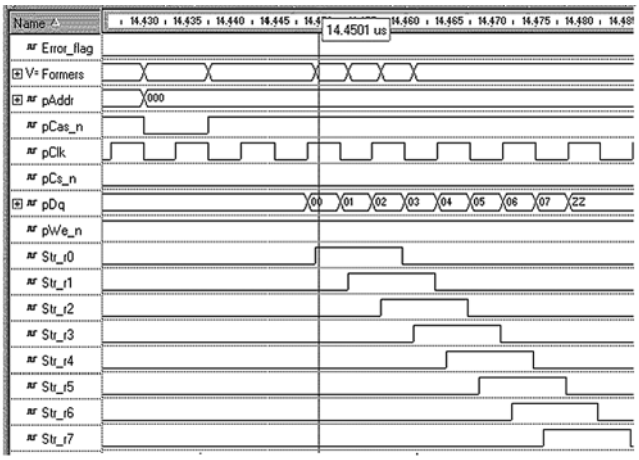


Рис. 6. Процесс считывания пакета данных длиной 8 слов

После выполнения теста и анализа состояния флага ошибки на панель консоли выдаются сообщения вида: «Error in model!» или «Model is correct!» На временно́й диаграмме результат выполнения теста представляется сигналом ошибки «Error_flag».

Для фиксирования моментов времени, в которые происходит приём считанных данных, введены специальные сигналы синхронизации «Str_r0-Str_r7». Временны́е параметры данных сигналов соответствуют требованиям, предъявляемым к времени выборки пакета считанных данных. Число сигналов, предназначенных для приёма данных, равно длине считанного пакета данных. Процесс считывания пакета длиной 8 слов показан на рис. 6, на котором вертикальная линия показывает момент приёма первого слова данных. Флаг ошибки «Error_flag» установлен в нулевое состояние, что соответствует отсутствию ошибок в модели. Преимущества нового метода формирования тестов для верификации VHDL-моделей микросхем памяти заключаются в следующем:

процесс генерации программ тестов автоматизирован;

программы тестов формируются алгоритмическим способом;

повышается качество верификации моделей микросхем памяти;

используются программы тестов, разработанные ранее на языке Prover;

автоматически формируются программы тестов на VHDL-языке для микросхем памяти различной ёмкости, имеющих различную структуру;

обеспечивается более простой способ локализации ошибок в программах моделей и тестах за счёт автоматизации процесса сравнения считанных и эталонных данных.

Интегрированную систему можно применять для верификации VHDL-моделей микросхем и модулей памяти, которые изготавливаются фирмами Corsair, Cypress, Micron, Kingston Technology, SK Hynix и др., что позволит изучить все выполняемые функции и сократить сроки проектирования контроллеров для вычислительных систем различного назначения.

Выводы. Применение интегрированной системы позволяет сосредоточить основные усилия на создании новых мобильных программ для диагностирования микросхем памяти базовой ёмкости, а необходимые программы для микросхем памяти заданной ёмкости будут генерироваться автоматизированно. При этом затраты на проектирование программ значительно снижаются, потому что для каждого нового объёма диагностируемого изделия не требуется повторять весь процесс создания программы. Кроме того, трудоёмкость локализации и устранения ошибок в программах, предназначенных для верификации моделей микросхем памяти небольшого объёма, значительно ниже, чем трудоёмкость отладки программ, предназначенных для испытаний серийных полупроводниковых запоминающих устройств большой ёмкости.

В предлагаемом методе верификации моделей микросхем памяти осуществляется алгоритмическая генерация тестовых воздействий по заданным алгоритмам, что обеспечивает сокращение объёма памяти для хранения программ тестов. Обеспечивается автоматическое сравнение считанных и эталонных данных, что снижает трудоёмкость оценки адекватности VHDL-моделей микросхем памяти и уменьшает сроки проектирования вычислительных систем, особенно если в них используются новые образцы контроллеров запоминающих устройств.

Интегрированную систему для верификации моделей микросхем полупроводниковой памяти могут применять фирмы, проектирующие вычислительные системы, содержащие современные быстродействующие запоминающие устройства, что обеспечит снижение трудоёмкости проектных работ и позволит сократить сроки выхода новых изделий на рынок.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 16-08-00393).

Библиографические ссылки

1. **Кудлаенко В.М., Мовчан Ю.В., Рябцев В.Г.** Методы верификации VHDL-моделей микросхем памяти компьютеров. Киев: Корнійчук, 2007. 172 с.

2. **CY7C1481BV25-VERILOG** [Electronic resourse]. Access mode: http://www.cypress. com/documentation/ models/cy7c1481bv25-verilog?Source=search &cat (Date: 04/30/2017).

3. **VHDL: RAM** [Electronic resourse]. Access mode: http://www.deathbylogic.com/2013/ 02/vhdl-ram/ (Date: 04/30/2017).

4. **Аль Мади М.К., Моамар Д.Н., Рябцев В.Г.** Алгоритмы тестового диагностирования полупроводниковых запоминающих устройств. Киев: Корнійчук, 2008. 220 с.

5. **Рябцев В.Г., Моамар Д.Н.** Метод и средство визуализации алгоритмов тестов диагностирования запоминающих устройств // Электронное моделирование. 2010. № 3. С. 43—52.

6. **Рябцев В.Г., Шубович А.А., Евсеев К.В.** Автоматизированное проектирование дискретных тестов диагностирования запоминающих устройств // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 6. С. 288—294.

7. **Almadi M.K., Ryabtsev V.G.** New Infrastructure for Memory Tests Design // Proceedings of the International Workshop Critical Infrastructure Safety and Security (CrISS-DESSERT 2011). May 11—13, 2011. Kirovograd. P. 434—440.

8. **Almadi M., Moamar D., Ryabtsev V.** New Methods and Tools for Design of Tests Memory // Proceedings of East-West Design & Test Workshop (EWDTW'10): (9—12 Sep. 2011, Sevastopol, Ukraine). Kharkiv: KHNURE, 2011. P. 319—325.

9. **Ryabtsev V., Almadi M.** Strategy of Adaptive Diagnosing of Memory Modules // Software Engineering. 2015. Iss. 3(1). P. 1—6.

10. **Ryabtsev V., Evseev K., Almadi M.** The Concept of Memory Device Diagnosis Algorithm Design // J. of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). 2016. Vol. 3. Iss. 10. P. 5771—5774.

11. **Меликов А.В.** Преимущества применения имитационного подхода к моделированию выходных сигналов средств измерений // Материалы Шляндинских чтений — 2016. Пенза: Изд-во ПГУ, 2016. С. 43—44.

12. **Ryabtsev V., Almadi M.** New Technology for Memory Tests Design // Intern. J. of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER). 2015. Vol. 02. Iss. 06. P. 520—526.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций, ищущих новые рынки для реализации своей продукции, услуги по размещению рекламы и объявлений. Цены за публикацию рекламы умеренные.

УДК 658.511

В.А. Долгов, д-р техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет «Станкин»),
А.А. Кабанов, канд. техн. наук
(Московский авиационный институт — национальный исследовательский университет)

v-dolgov@yandex.ru

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ФОРМИРОВАНИЮ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В качестве основного объекта проектирования при техническом перевооружении и технологической подготовке производства предложена производственно-технологическая система машиностроительного предприятия. Описан подход к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия на разных этапах её жизненного цикла.

Ключевые слова: информационная модель; производственно-технологическая система; жизненный цикл; цифровое производство.

As the main object of design at the technical re-equipment and technological preparation of production, an industrial-technological system of a machine-building enterprise is proposed. An approach to the formation of an information model for the production and technological system of a machine-building enterprise at different stages of its life cycle is described.

Keywords: information model; production and technological system; life cycle; digital production.

Современный период развития машиностроительных предприятий характеризуется переходом от выпуска сравнительно постоянной номенклатуры продукции к производству персонифицированной продукции в рамках цифрового производства [1]. Смена парадигмы приводит к необходимости обеспечения гибкости и переналаживаемости производственной системы, которые реализуются в рамках технологической подготовки производства или технического перевооружения [2, 3]. Это требует комплексной проработки технологических и организационных решений.

Таким образом, технологическая система должна разрабатываться совместно с системами управления, технического обслуживания и ремонта, образуя единый объект проектирования.

Разработка новых подходов к проектированию машиностроительных предприятий включает определение комплексного объекта проектирования, его информационной модели и процессов её поддержки на всех этапах жизненного цикла.

В качестве такого объекта проектирования предложена производственно-технологическая система (ПТС) предприятия, которая включает основные блоки, представленные на рис. 1.

Эффективность функционирования производственно-технологической системы машиностроительного предприятия на разных этапах жизненного цикла во многом определяется качеством информационного обеспечения.

Рис. 1. Основные блоки и компоненты производственно-технологической системы

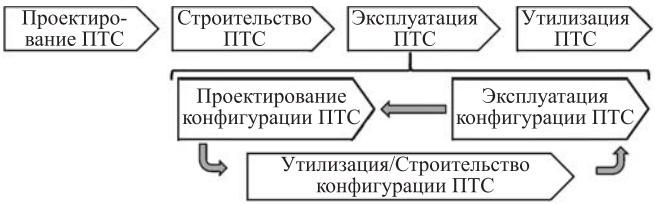


Рис. 2. Содержание этапа «Эксплуатация ПТС» жизненного цикла производственно-технологической системы

Одним из основных видов информационного обеспечения является информационная модель. Согласно ГОСТ Р ИСО 10303-1—99 под информационной моделью (ИМ) понимается формальная модель ограниченного набора фактов, понятий или инструкций, предназначенная для обеспечения выполнения конкретного требования. Информационная модель производственно-технологической системы машиностроительного предприятия предназначена для обеспечения информационной поддержки процессов управления её конфигурацией на разных этапах жизненного цикла.

В настоящей работе производственно-технологическая система машиностроительного предприятия рассматривается как сложная организационно-техническая система, предназначенная для производства изделий. Этапы жизненного цикла производственно-технологической системы отличаются от этапов жизненного цикла производимых изделий (летательные аппараты, автомобили и др.).

Основным отличием является то, что производственно-технологическая система машиностроительного предприятия на этапе «Эксплуатация ПТС» включает следующие стадии: «Проектирование конфигурации ПТС», «Утилизация/Строительство конфигурации ПТС» и «Эксплуатация конфигурации ПТС» (рис. 2). Это вызвано необходимостью её технического перевооружения при изменении номенклатуры и/или программы выпуска.

Таким образом, ИМ производственно-технологической системы машиностроительного предприятия претерпевает периодические существенные изменения на этапе «Эксплуатация ПТС».

ИМ *i*-й конфигурации ПТС включает информационные блоки, которые формируются на разных стадиях этапа «Эксплуатация ПТС».

На стадиях «Проектирование конфигурации ПТС» и «Строительство/Утилизация конфигурации ПТС» формируется блок проектных данных, на стадии «Эксплуатация конфигурации ПТС» — блок операционных данных.

Основные требования к составу данных ИМ производственно-технологической системы предприятия и формату их представления приведены в таблице.

Основные требования к составу данных информационной модели производственно-технологической системы предприятия и формату их представления

№ п/п	Требования
1	**Проектные данные**
1.1	**Требования к составу основных данных**
1.1.1	Данные о номенклатуре изделий и программе выпуска с указанием изделий собственного производства и покупных
1.1.2	Данные о конструктивных параметрах изделий
1.1.3	Данные технологической документации, включая маршрутное описание технологического процесса; закрепление операций за рабочими местами; значения трудоёмкости и технологических циклов изготовления изделий; процессы, необходимые для обеспечения качества изделий, но время выполнения которых не входит в трудоёмкость; ведомости оснастки
1.1.4	Технологически необходимые требования к техническим возможностям технологического оборудования для выполнения технологических операций
1.1.5	Данные о составе и параметрах технологического оборудования
1.1.6	Требования к энергообеспечению, установке и монтажу технологического оборудования
1.1.7	Данные о расположении технологического оборудования
1.1.8	Данные о расположении основных и вспомогательных производственных помещений
1.2	**Требования к формату представления данных и их связям**
1.2.1	Данные должны быть представлены в формате, обеспечивающем возможность их обработки в автоматическом режиме
1.2.2	Должны быть заданы связи между параметрами изделий и параметрами технологического оборудования

Окончание таблицы

№ п/п	Требования
2	**Операционные данные**
2.1	**Требования к составу основных данных**
2.1.1	Данные о показателях надёжности технологического оборудования
2.1.2	Данные о плановой и фактической загрузке технологического оборудования
2.1.3	Данные о плановых и фактически выполненных работах технического обслуживания и ремонта технологического оборудования
2.1.4	Сменно-суточные задания, размеры партий запуска изделий в производство
2.2	**Требования к формату представления данных и их связям**
2.2.1	Данные должны быть представлены в формате, обеспечивающем возможность их обработки в автоматическом режиме
2.2.2	Должны быть заданы связи между показателями надёжности технологического оборудования и графиком работ технического обслуживания и ремонта оборудования
2.2.3	Должны быть заданы связи между технологическими процессами и данными о плановой и фактической загрузке технологического оборудования

Проработка технологических решений, а также процессов технологической подготовки производства для конкретного предприятия на разных этапах ранее выполнялась и сопровождалась силами одной проектной организации. Это не только обеспечивало возможность оперативной корректировки технологических решений в соответствии с реальными условиями при внедрении проекта, но и определяло подобие технологических решений в рамках одной отрасли. Работы выполнялись одним исполнителем на базе одной информации.

В настоящее время в связи с изменением системы выполнения проектов технического перевооружения и модернизации машиностроительных предприятий указанные виды деятельности обособлены с точки зрения как исполнителей работ, так и их информационного обеспечения.

Анализ требований к составу и содержанию разделов проектной документации на объекты капитального строительства производственного и непроизводственного назначения, установленных в постановлении Правительства Российской Федерации от 16 февраля 2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (с изм. на 15 февраля 2011 г.) позволяет сделать вывод о том, что проектная документация не обеспечивает выполнение требований, предъявляемых к информационной модели производственно-технологической системы предприятия.

Отчётная документация содержит лишь фрагменты ИМ производственно-технологической системы предприятия, необходимые для представления в органы государственной экспертизы в соответствии с требованиями к составу и содержанию разделов проектной документации.

Проектные рабочие материалы, содержащие исходные данные для формирования проектных решений, не оформляются в виде информационной модели. Таким образом, использование этих материалов другими проектными организациями не представляется возможным.

Если проработка проектных технологических решений и технологическая подготовка производства на стадиях «Проектирование конфигурации ПТС» и «Эксплуатация конфигурации ПТС» выполнялась разными исполнителями, то после оформления отчётов проектные материалы теряются.

На рис. 3 показаны информационные потоки между стадиями проектирования конфигурации производственно-технологической системы.

При проектировании конфигурации производственно-технологической системы одним исполнителем помимо отчётных материалов дополнительно передаются проектные рабочие материалы, объём которых от стадии к стадии возрастает. На рис. 3 эти информационные потоки показаны горизонтальными пунктирными стрелками.

При проектировании разными исполнителями информационные потоки включают следующие документы: технические отчёты, проектную и рабочую документацию. На рис. 3 указанные потоки обозначены сплошными

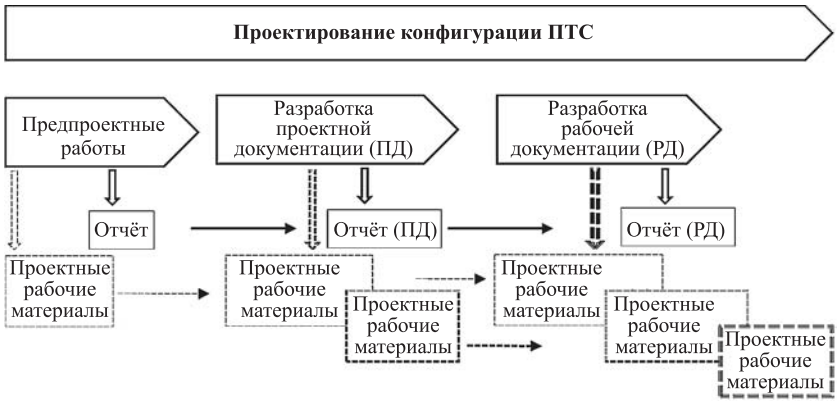


Рис. 3. Информационные потоки при проектировании конфигурации производственно-технологической системы

горизонтальными стрелками. Это приводит к необходимости дополнительных исследований и формирования исходной информации, полученной на предыдущем этапе другим исполнителем, что увеличивает временные и финансовые затраты.

Данная проблема обусловлена следующими причинами:

1) недостаточной проработкой процессов организационного взаимодействия исполнителей;

2) низким уровнем информационного обеспечения, который определяется качеством информационной модели и исходных данных.

Существенное значение имеет формат информационной модели. В мировой практике выделяют машинно- и человеко-ориентированные форматы.

В отечественной практике при проектировании машиностроительных предприятий преимущественно используется человеко-ориентированный формат информационной модели. Человек-специалист выступает как часть информационной модели, имеет знания о связях информационных объектов, а также обрабатывает данные, в том числе с использованием программных средств для расчётов. Это затрудняет передачу информационной модели, поскольку с моделью необходимо передавать и соответствующих специалистов.

Современные тенденции построения цифрового машиностроительного производства требуют использования машинно-ориентированного формата информационных моделей, предназначенного для обработки данных вычислительными системами [1].

В настоящее время для решения локальных задач при проектировании производственно-технологической системы машиностроительного предприятия по преобразованию, управлению и поддержке материального потока формируются соответствующие информационные модели, связи между которыми отсутствуют.

Для формирования машинно-ориентированного формата информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия необходимо обеспечить информационные связи между различными моделями на основе единого информационного пространства, а также организационное взаимодействие разных исполнителей [4, 5].

Для этого предлагается выделять статические и динамические информационные модели ПТС. Указанные виды информационных моделей используются для описания набора состояний производственно-технологической системы на этапах «Проектирование ПТС», «Строительство ПТС» и «Эксплуатация ПТС».

На этапе «Проектирование ПТС» выделяют начальное состояние ПТС, которое описывается базовой статической информационной моделью (рис. 4).

В процессе технического перевооружения ПТС или технологической подготовки производства на этапе «Эксплуатация ПТС» формируются конфигурации ПТС (см. рис. 2), которые описываются соответствующими статическими ИМ. Таким образом, статическая информационная модель $i + 1$ конфигурации ПТС является производной моделью базовой i-й статической ИМ ПТС и в свою очередь яв-

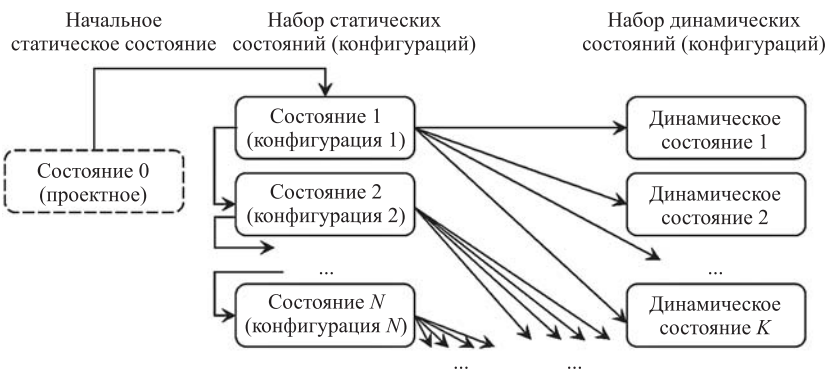


Рис. 4. Состояния производственно-технологической системы

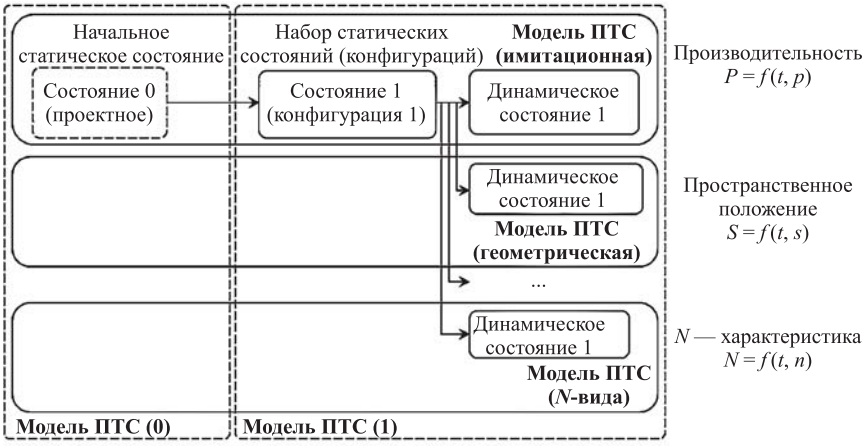


Рис. 5. Набор характеристик динамического состояния *i*-й конфигурации производственно-технологической системы в зависимости от используемого вида модели

ляется базовой моделью для производных от неё частных ИМ $i + 1$ конфигурации ПТС.

Статические информационные модели ПТС содержат проектные данные и используются на этапах «Проектирование ПТС» и «Строительство ПТС», а также на стадиях «Проектирование конфигурации ПТС» и «Утилизация/Строительство конфигурации ПТС» этапа «Эксплуатация ПТС». Динамические информационные модели дополнительно к проектным данным содержат операционные данные (см. табл. 1) и используются на стадии «Эксплуатация конфигурации ПТС» (рис. 4).

Динамическое состояние для выбранной статической конфигурации производственной системы определяется набором изначально зафиксированных параметров (режимы работы элементов производственного подразделения, объёмы операционных партий, партий выпуска; график запусков партий в производство и др.) и случайных факторов (брак, отклонения от графика поставки комплектующих изделий и материалов, отказ элементов производственной системы и др.).

Общая характеристика динамического состояния ПТС может быть получена путём обработки статистики по состоянию каждого из элементов и системы в целом за интересуемый период (время работы и простоя каждого из элементов, время выполнения определённых операций и др.). Так, состояние *i*-й конфигурации ПТС описывается набором характеристик, получаемых с использованием различных видов ИМ, характеризующих частные характеристики ПТС (рис. 5).

Динамическое состояние ПТС может характеризоваться имитационной моделью [6, 7] для получения характеристик производительности, геометрической моделью для определения параметров пространственного положения элементов системы в момент времени *t*, а также другими частными ИМ. Частные модели используют одну и ту же информационную модель статического состояния текущей конфигурации ПТС, являющейся для них базовой моделью.

На рис. 6 показана схема получения частной характеристики статической модели (конфигурации) производственно-технологической системы с использованием частной модели динамического состояния в соответствии со специальным запросом.

Таким образом, модель базового описания может служить исчерпывающей основой для получения любой (в пределах ограничений базовой модели) характеристики ПТС, которая может быть определена путём формирования соответствующего запроса и его обработки с помощью соответствующего алгоритма, реализуемого в том числе программно, на основе частной ИМ *M*-го вида. То есть разрабатываемую информационную модель можно представить в виде системы базового описания статической ИМ и набора моделей, позволяющих получать частные характеристики ПТС системы и её элементов.

Из сформулированного принципа следует вывод: чем более детально выполнена базовая статическая информационная модель, обеспечивающая единое информационное пространство, тем легче разработать частные ИМ для получения частных характеристик ПТС системы. При этом предполагается, что степень детализации статической информацион-

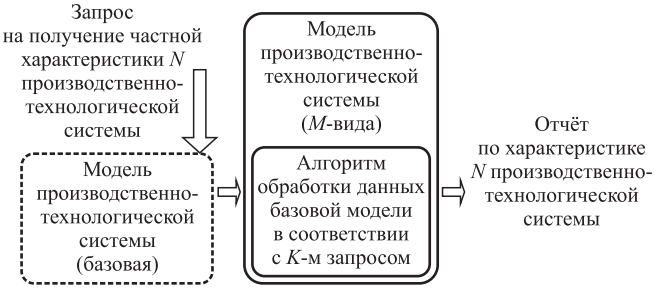


Рис. 6. Схема получения частной характеристики производственной системы с использованием модели соответствующего вида на основе сформированного запроса

ной модели основана на как можно большей ёмкости семантики используемых понятий. В противном случае статическая информационная модель будет ориентирована на преимущественное использование частных моделей одного вида и её гибкость будет существенно ограничена функциональностью этих моделей.

Для базового описания информационной модели предлагается следующий порядок её разработки:

1) определить область использования информационной модели производственно-технологической системы предприятия и её назначение;

2) в соответствии с областью использования и назначением сформировать требования к информационной модели, в том числе требования по её функциональности. Одним из основополагающих требований должен быть отказ в максимально возможной степени от использования неформализованных процедур при работе с моделью, а также от использования укрупнённых процедур для окончательного расчёта параметров элементов производственной системы (например, должны быть пересмотрены и формализованы процедуры группирования и приведения изделий номенклатуры, всевозможные процедуры валового расчёта с использованием поправочных коэффициентов и др.);

3) на основе требований определить необходимую структуру модели, потенциальные методы обработки данных (базовые алгоритмы и методики);

4) выбрать программные средства обработки данных. При отсутствии таковых — разработать частное техническое задание на проектирование необходимого программного средства получения частных характеристик ПТС;

5) определить типовые формы отчётов представления данных информационной модели.

В качестве семантической основы базового описания производственно-технологической системы предложено использование понятия технологических систем в соответствии с основными положениями ГОСТ 27.004—85. Схема декомпозиции объектов ПТС представлена на рис. 7.

На рис. 7 показаны основные объекты выделенных блоков и компонентов ПТС, а также связи между ними на разных уровнях декомпозиции: «Предмет производства» связан с соответствующими «Средствами технологического оснащения» через «Технологический процесс». Объект «Технологический процесс» определяет состояния предмета производства. Объект «Процесс управления материальным потоком» реагирует на внешние и внутренние воздействия и имеет связи со всеми объектами ПТС. Каждый из объектов верхнего уровня может быть последовательно условно декомпозирован до элементарного объекта в рамках этого типа. Глубина декомпозиции зависит от требуемой степени детализации описания производствен-

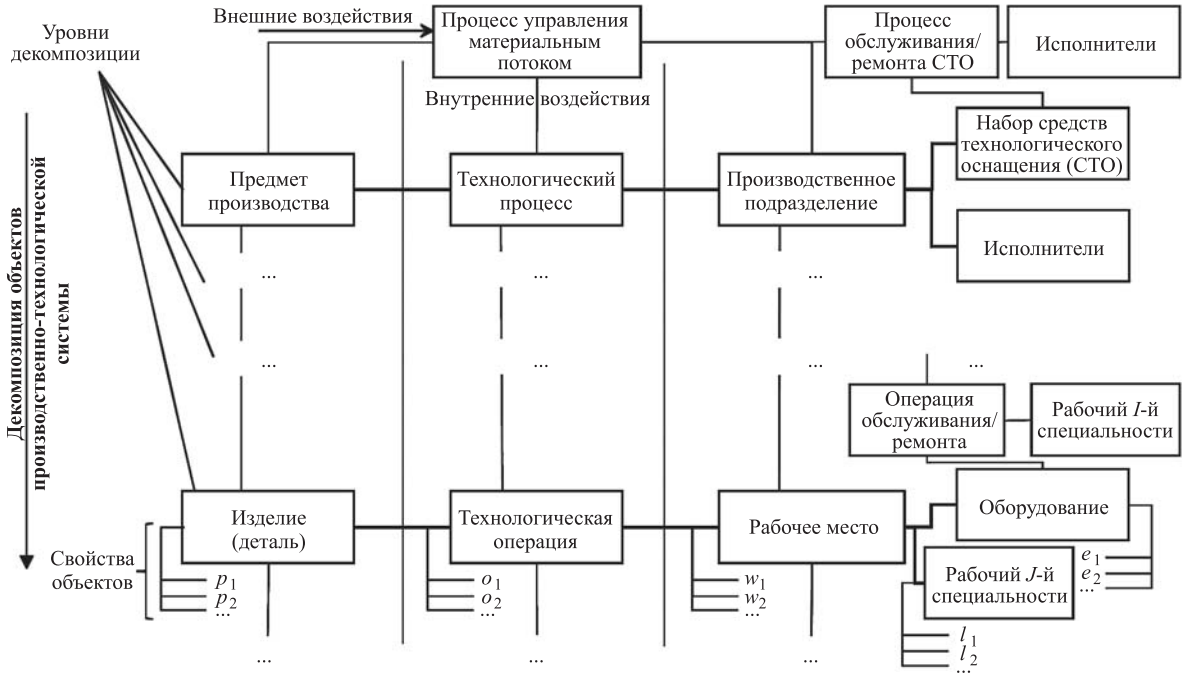


Рис. 7. Схема декомпозиции объектов ПТС

но-технологической системы и целесообразности учёта параметров объектов ПТС. Так, объект «Деталь» может быть декомпозирован на комплекс поверхностей, объект «Технологическая операция» — на переходы и т. д.

Выводы. Для обеспечения перехода отечественных машиностроительных предприятий к парадигме производства персонифицированной продукции в рамках цифрового производства предлагается использовать производственно-технологическую систему как единый объект проектирования, включающий процессы преобразования материального потока, системы управления материальным потоком, технического обслуживания и ремонта оборудования.

Предлагаемые принципы и порядок формирования базовой информационной модели позволят реализовать более эффективное взаимодействие участников жизненного цикла ПТС, что сделает возможным использование результатов работ, полученных на предыдущих этапах её жизненного цикла.

Рассмотренные особенности предлагаемой информационной модели облегчат её интеграцию с другими информационными системами, используемыми на предприятии (ERP, MES, SCADA и др.).

Библиографические ссылки

1. **Григорьев С.Н., Кутин А.А., Долгов В.А.** Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ «Станкин». 2014. № 4 (31). С. 10—15.

2. **Вороненко В.П., Соломенцев Ю.М., Схиртладзе А.Г.** Проектирование машиностроительного производства / Под ред. Ю.М. Соломенцева. 2-е изд., стереотип. М.: Дрофа, 2006. 380 с.

3. **Grigor'ev S.N., Dolgov V.A., Krasnov A.V., Kabanov A.A., Andreev N.S.** A method of technologic audit of technical re-equipment projects in aircraft production enterprises // Russian Aeronautics. 2015. Vol. 58. Iss. 2. P. 244—250.

4. **Kutin A., Dolgov V., Sedykh M.** Information Links between Product Life Cycles and Production System Management in Designing of Digital Manufacturing // Procedia CIRP. 2016. Vol. 41. P. 423—426.

5. **Кабанов А.А.** Объектная модель анализа изделий ЛА с учётом явления наследования для оценки и управления эффективностью производственных систем дискретного машиностроения в ходе их организационно-технического проектирования и модернизации // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 161—168.

6. **Dolgov V.A.** Simulation of technological systems in custom production // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. Iss. 9. P. 951—955.

7. **Долгов В.А., Кабанов А.А., Андреев Н.С., Дацюк И.В.** Повышение эффективности разработки имитационных моделей при проектировании новых многономенклатурных машиностроительных цехов // Тр. 7-й всерос. науч.-практ. конф. «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015). 21—23 окт. 2015 г., Москва. В 2 т. / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова РАН. Т. 1. С. 73—79.

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 первоисточника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — N, том — V., страницы — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом htt://translit.ru/.

УДК 681.513

В.Н. Афанасьев, д-р техн. наук, проф., **К.А. Неусыпин,** д-р техн. наук, проф.
(МИЭМ ВШЭ, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
neysipin@mail.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

На длительных интервалах функционирования летательных аппаратов без коррекции стационарных навигационных систем погрешности платформенных инерциальных навигационных систем достигают неприемлемых величин, и их необходимо компенсировать. Коррекция навигационных систем осуществляется в их структуре с помощью алгоритмов управления. Разработаны алгоритмы управления с использованием линейных стационарных и нестационарных моделей. Рассмотрен метод формирования алгоритмов оптимизации нестационарных систем управления, основанный на применении уравнения Гамильтона—Якоби и принципа минимума Понтрягина. Построен алгоритм управления с оптимизацией параметров нестационарных моделей погрешностей.

Ключевые слова: летательный аппарат; инерциальная навигационная система; алгоритм управления; коррекция в структуре системы; оптимизация параметров модели.

On long functioning intervals of aircraft without correction of stationary navigation systems, the errors of platform inertial navigation systems reach unacceptable values, and they must be compensated. Correction of navigation systems is implemented in their structure with by using the control algorithms. The control algorithms with the use of linear stationary and non-stationary models are developed. The method of forming optimization algorithms for non-stationary control systems based on the application of the Hamilton-Jacobi equation and the Pontryagin minimum principle is considered. A control algorithm with parameters optimization of the errors non-stationary models is constructed.

Keywords: aircraft; inertial navigation system; control algorithm; correction in the system structure; optimization of model parameters.

Введение. Эффективность применения современных многофункциональных летательных аппаратов (ЛА) определяется не только их лётно-техническими характеристиками и вооружением, но и возможностями бортового оборудования по информационному обеспечению боевых действий, управлению оружием и защите ЛА.

В основе бортового оборудования ЛА лежит интеграция бортового оборудования на борту ЛА в прицельно-навигационные комплексы (ПНК).

ПНК ЛА Су-27СМ, Су-30СМ, Су-34, МиГ-29К построены по принципу объединения измерительных систем вокруг бортовой цифровой вычислительной системы (БЦВС) для решения комплексных задач, задач навигации, управления и взаимодействия с сохранением независимости работы отдельных входящих в комплекс систем.

В составе ПНК ЛА Су-27СМ и Су-34 использованы платформенные инерциальные навигационные системы (ИНС) типа Ц-060 и ИНС-2000 соответственно.

Основными чувствительными элементами ИНС типа Ц-060К являются одноосные маятниковые акселерометры, установленные на гиростабилизированной платформе (ГСП), построенной на базе двух динамически настраиваемых гироскопов с внутренним кардановым подвесом. Выходные сигналы Ц-060 (Ц-060К) содержат методические и инструментальные погрешности [1, 2].

Основные корректирующие каналы в составе ПНК организованы на основе данных ГЛОНАСС. При отказе ГЛОНАСС дополнительные корректирующие каналы в составе ПНК организованы на основе данных РЛС, доплеровского измерителя скорости и угла сноса (ДИСС) из состава ПНК самолёта Су-34 и систем визуальной ориентации [3].

Как правило, базовой системой ПНК является ИНС. ИНС имеют методические и инструментальные погрешности. Основным недостатком ИНС является нарастание этих погрешностей с течением времени.

При функционировании ИНС на длительных интервалах времени погрешности могут

достигать недопустимо больших величин, поэтому коррекция осуществляется с помощью алгоритма управления для компенсации ошибок в структуре ИНС, тем самым уменьшая амплитуду колебаний ошибок и улучшая качество переходного процесса.

В данной статье разработаны алгоритмы управления для коррекции ИНС в нестационарной и нелинейной постановке задачи.

Коррекция в структуре инерциальной навигационной системы. ГСП отклоняется относительно выбранной сопровождающей системы координат вследствие дрейфа гироскопов, смещения нуля и дрейфа акселерометров, погрешностей первого интегратора. Увеличение углов отклонения ГСП приводит к дрейфу платформы, обусловленному моментами остаточной несбалансированности вокруг осей прецессии гироскопов, анизоупругостью ГСП и гироскопов при колебании и вибрации основания. Ошибки автономной ИНС возрастают с течением времени, поэтому для получения достоверной информации необходимо компенсировать отклонения ГСП от заданного положения. В практических приложениях осуществляют демпфирование погрешностей ИНС без изменения и с изменением собственной частоты колебаний [1].

Полностью исключить погрешности с помощью демпфирования не представляется возможным, так как они нарастают с течением времени.

Таким образом, при функционировании ИНС на длительных интервалах времени (более 1 ч) без коррекции стационарных станций углы отклонения ГСП нарастают. Следствием этого является неадекватность математической модели реальному процессу изменения погрешностей ИНС. В этом случае применяют коррекцию ИНС в структуре системы с помощью алгоритмов управления [4, 5]. Схема коррекции в структуре ИНС представлена на рис. 1.

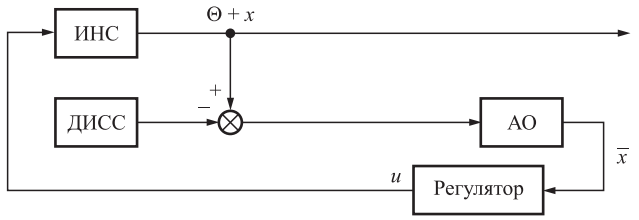


Рис. 1. Схема коррекции ИНС с использованием регулятора:

Θ — истинная навигационная информация; АО — алгоритм оценивания; x — вектор состояния, включающий ошибки ИНС; $\hat{x}$ — оценка вектора погрешностей ИНС; u — вектор управления

Линейный стационарный алгоритм управления для коррекции ИНС. Рассмотрим стационарное уравнение ошибок ИНС:

$$x_k = Ax_{k-1} + u_{k-1} + \omega_{k-1}, \qquad (1)$$

где A — матрица системы; x_k — вектор состояния; u_{k-1} — вектор управления; ω_{k-1} — вектор входного возмущения.

В структуре уравнения (1) погрешностей ИНС для одного из горизонтальных информационных каналов введём следующие обозначения:

$$x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \Phi = \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1-\beta T \end{bmatrix};$$

$$W_{k-1} = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \omega_{k-1} \end{bmatrix},$$

где W_1 — дискретный аналог белого гауссового шума; β — средняя частота случайного изменения дрейфа; δV_k — ошибка ИНС в определении скорости; φ_k — угол отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника; g — ускорение силы тяжести; R — радиус Земли; T — период дискретизации.

Представлены уравнения погрешностей ИНС в дискретной форме, которые используются в дальнейшем при разработке алгоритмов.

Для определения управления в уравнении (1) рассчитаем сумму дисперсий вектора состояния:

$$J = spM[x_k x_k^T] = M[x_k^T x_k]. \qquad (2)$$

Найдём оптимальное значение матрицы регулятора из условия равенства нулю градиента:

$$\frac{\partial J}{\partial K_{k-1}} = 0. \qquad (3)$$

Вектор управления имеет вид

$$u_{k-1} = -K_{k-1}\hat{x}_{k-1}, \qquad (4)$$

где K_{k-1} — матрица регулятора; $\hat{x}_{k-1}$ — оценка вектора состояния.

Однако в структуре ИНС имеются лишь две точки приложения управляющих воздействий, а именно: вход первого интегратора и вход датчика момента. Поэтому необходимо разработать метод управления ИНС для слу-

чая, когда управлению подлежит только часть вектора состояния.

Представим вектор состояния в виде суммы векторов z_k и y_k, выделяя в векторе z_k только компоненты, которыми можно управлять, а в векторе y_k — все оставшиеся компоненты вектора состояния. Тогда уравнение (1) будет иметь вид

$$x_k = \Phi z_{k-1} + Gy_{k-1} + \omega_{k-1} + u_{k-1}, \qquad (5)$$

где Ф — матрица модели; G — матрица смещения.

Обозначим

$$\omega_{k-1} + Gy_{k-1} = f_{k-1}. \qquad (6)$$

Определим вектор управления в виде

$$u_{k-1} = -(K_{k-1}\hat{z}_{k-1} + \hat{f}_{k-1}). \qquad (7)$$

Использование в регуляторе оценки вектора состояния предполагает предварительную его оценку с помощью алгоритма оценивания.

Оптимальное управление определяется нахождением такой матрицы регулятора, при которой функционал

$$J = M[x_k^T x_k] \qquad (8)$$

принимает минимальное значение.

Оптимальное значение матрицы регулятора имеет следующий вид [1]:

$$K_{k-1} = \Phi. \qquad (9)$$

Представленный метод управления позволяет компенсировать управляемые ошибки системы, но с условием, что оцениваются все компоненты вектора состояния. Этому условию удовлетворяют ошибки ИНС по скорости, углы отклонения ГСП от плоскости горизонта и дрейфы гироскопов. Однако компенсация дрейфов ГСП с помощью разработанного алгоритма не осуществляется, так как точная априорная информация о корреляционной матрице дрейфа гироскопов отсутствует.

Таким образом, с помощью представленного регулятора компенсируются ошибки ИНС по скорости и углы отклонения от плоскости горизонта.

Адаптивный алгоритм коррекции ИНС. При выполнении критерия расходимости [4] в фильтре Калмана и регуляторе используется матрица $A^*_{k,k-1}$, которая отличается большим периодом дискретизации. Оценка ошибок ИНС и коррекция ИНС проводятся в этом случае реже, а точность оценивания и соответственно точность регулирования повышаются за счёт увеличения степени наблюдаемости. При изменении режима работы системы проверка качества оценивания повторяется.

Адаптивный регулятор имеет вид

$$u_k = \begin{cases} -A_{k+1,k}\hat{x}_k \\ \text{при } \upsilon_k^T\upsilon_k \leqslant \gamma sp[H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k]; \\ -A^*_{k+1,k}\hat{x}_k \\ \text{при } \upsilon_k^T\upsilon_k > \gamma sp[H_k P_{k/k-1} H_k^T + R_k]. \end{cases} \qquad (10)$$

Следует отметить, что повышение точности оценивания вследствие увеличения периода дискретизации известно и является лишь подтверждением правильности предложенного принципа построения адаптивного регулятора. Повышение степени наблюдаемости ошибок ИНС путём изменения какого-либо другого параметра также приводит к повышению точности оценивания, а следовательно, и регулирования.

В качестве примера рассмотрим задачу коррекции ИНС посредством адаптивного регулятора для одного горизонтального канала системы. Для этого использовалась простейшая математическая модель ошибок ИНС, которая имеет вид

$$\begin{aligned} & x_k = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{k-1}} + \omega_{k-1} - \boldsymbol{K}^{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{k-1}}\hat{x}_{k-1}; \\ & x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \varphi_k \end{bmatrix}; \\ & \boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 1 & -gT \\ T/R & 1 \end{bmatrix}; \\ & \omega_{k-1} = \begin{bmatrix} 0 \\ \varepsilon_{k-1} \end{bmatrix}; \\ & \boldsymbol{K}^{\boldsymbol{1}}_{\boldsymbol{k-1}} = A; \\ & \boldsymbol{K}^{\boldsymbol{2}}_{\boldsymbol{k-1}} = \begin{bmatrix} 1 & -3gT \\ 3T/R & 1 \end{bmatrix}, \end{aligned} \qquad (11)$$

где $\boldsymbol{\varepsilon_{k-1}}$ — скорость дрейфа ГСП, представляющая собой стационарный случайный процесс с экспоненциальной корреляционной функцией; $\boldsymbol{K}^{\boldsymbol{i}}_{\boldsymbol{k-1}}$ — матрица регулятора, $i = 1, 2$; $\boldsymbol{K}^{\boldsymbol{1}}_{\boldsymbol{k-1}}$ — матрица оптимального регулятора; $\boldsymbol{K}^{\boldsymbol{2}}_{\boldsymbol{k-1}}$ — матрица адаптивного регулятора.

При увеличении уровня измерительного шума, которое не учитывалось в ковариационной матрице измерительного шума фильтра Калмана, ошибка оценивания увеличивается, следствием чего является увеличение угла отклонения ГСП ИНС с оптимальным регулятором.

При увеличении измерительного шума углы отклонения ГСП возрастают и превышают предельные значения, например $|\boldsymbol{\varphi}_n| = 1\cdot10^{-5}$ рад. В адаптивном регуляторе вместо матрицы K^1 используется матрица K^2. Применение адаптивного выбора матрицы регулятора позволяет существенно уменьшить углы отклонения ГСП от плоскости горизонта.

Таким образом, синтезирован адаптивный регулятор ИНС с релейным выбором матрицы управления. При этом нестационарный характер изменения некоторых параметров модели погрешностей ИНС в адаптивном регуляторе не учитывался.

Нестационарный алгоритм управления для коррекции ИНС. Рассмотрим линейную нестационарную систему, описывающую изменение погрешностей ИНС при коррекции в структуре системы:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + w(t), \qquad (12)$$

где x — $(n \times 1)$-вектор состояния; u — $(n \times 1)$-вектор управления; w_{k-1} — $(n \times 1)$-вектор входного шума, который является дискретным аналогом белого гауссова шума с нулевым математическим ожиданием; A — $(n \times n)$-матрица системы; B — $(n \times n)$-матрица управления.

$$x = \begin{bmatrix} \delta V_x & \delta V_y & \psi_x & \psi_y & \psi_z & \varepsilon_x & \varepsilon_y & \varepsilon_z \end{bmatrix}^T;$$

$$w = \begin{bmatrix} B_x & B_y & 0 & 0 & 0 & \varpi_x & \varpi_y & \varpi_z \end{bmatrix}^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -g & a_y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g & 0 & -a_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R} & 0 & \omega_z & -\omega_y & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R} & 0 & -\omega_z & 0 & \omega_x & 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{R}\mathrm{tg}\varphi & 0 & \omega_y & -\omega_x & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu \end{bmatrix},$$

а уравнение измерений имеет вид

$$z(t) = H(t)x(t) + v(t), \qquad (13)$$

где z — $(m \times 1)$-вектор измерений; v_k — $(m \times 1)$-вектор измерительного шума, который является дискретным аналогом белого гауссова шума с нулевым математическим ожиданием; H — $(m \times n)$-матрица измерений

$$z = \begin{bmatrix} z_x \\ z_y \end{bmatrix}; v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

δV_x, δV_y — составляющие погрешности в определении путевой скорости ЛА; a_x, a_y — составляющие ускорения ЛА; ψ_x, ψ_y, ψ_z — углы отклонения относительно опорной системы координат; ω_x, ω_y, ω_z — проекции абсолютной угловой скорости; ε_x, ε_y, ε_z — проекции скорости дрейфа; ϖ_x, ϖ_y, ϖ_z — возмущающие внешние воздействия; ϕ — широта местоположения; μ — средняя частота случайного изменения дрейфа гироскопов.

В уравнение (12) входят нестационарные составляющие, зависимые от движения ЛА.

Функционал качества сформулирован в смысле минимума дисперсии погрешностей ИНС. Оптимальное управление имеет вид

$$u(t) = -K\hat{x}(t), \text{ где } K = A. \qquad (14)$$

Алгоритм управления с оптимизацией для коррекции ИНС. Рассматривается метод формирования алгоритмов оптимизации нестационарных систем управления, основанный на применении уравнения Гамильтона—Якоби и принципа минимума Понтрягина. Построенные алгоритмы могут использоваться как для оптимизации самих нестационарных объектов, если для этой цели выделены соответствующие параметры, так и для оптимизации всей управляемой системы с помощью соответствующей параметрической настройки регуляторов. Эффективность разработанных алгоритмов продемонстрирована на примере системы коррекции в структуре инерциальной навигационной системы.

В процессе функционирования ИНС достоверная априорная информация о модели погрешностей отсутствует. Задачу построения управления приходится решать при неполном знании модели, а также в условиях стохастической неопределённости [6—8].

Одним из перспективных подходов синтеза оптимальных систем в указанной постановке задачи является метод алгоритмического конструирования [8]. Используем квадратичный функционал качества, что существенно упрощает реализацию алгоритмов, особенно на борту ЛА.

Выполнение сформулированных условий [7] гарантирует успешное «отслеживание» изменений параметров модели. При этом обеспечивается «перевод» функционала качества из любых периферийных значений к его минимальному значению асимптотически.

В работе [8] предложен способ идентификации нестационарного объекта с использованием модели с параметрической настройкой.

В рамках подхода алгоритмического конструирования разработан оригинальный алгоритм оптимизации нестационарных систем, основанный на принципе минимума Понтрягина. В алгоритме управления использована нестационарная матрица модели погрешностей ИНС, параметры которой зависят от характера полёта ЛА и подлежат определению.

Для упрощения выкладок проведём разработку алгоритма управления в непрерывной форме.

Пусть исследуемый нестационарный объект (погрешности ИНС) описывается векторным дифференциальным уравнением вида

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d}{dt}x(t) = f(x,u,\eta,a,t) \\ &x(t_0) = x_0, \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

где $x \in R^n$ — вектор состояния объекта; $u \in R^r$ — вектор управляющих воздействий; $\eta \in R^k$ — вектор возмущаемых параметров; $a \in R^p$ — вектор параметров, выделенных для оптимизации функционирования объекта.

В общем случае $k \geqslant p$.

Оптимизация системы управления осуществляется соответствующей перестройкой как параметров объекта, так и параметров алгоритма управления.

Предполагается, что:

вектор-функция $f(t, x, \eta, \alpha)$ гладкая и допускает дифференцирование необходимое количество раз по совокупности переменных;

параметрическая неопределённость имеет интервальный характер, т. е. $\underline{\eta}_i \leqslant \eta(t) \leqslant \overline{\eta}_i$, $i = 1, ..., k$, таким образом, известна область изменения возмущённых параметров объекта $\eta(t) \in \Lambda$;

область параметров, предназначенных для оптимизации системы управления при $u^0(t) \in U$, содержит значения, при которых достигается поставленная цель, т. е. $\alpha^0(t) \in A$, где A — область изменения параметров оптимизации.

Функционал качества зададим в виде функционала Больца:

$$J(x,u) = \Phi(x(T),T) + \int_{t_0}^{T} L(x,u,t)dt, \qquad (16)$$

где $\Phi(x(T),T) = K(x(T),T) + \gamma^T \Psi(x(T),T)$; $\gamma \in R^q$ — вспомогательная переменная.

Время окончания переходного процесса T может быть не задано или фиксированно.

Для системы управления с объектом (15) в предположении об отсутствии параметрических возмущений образуем гамильтониан

$$H(t,x,\lambda,u) = L(t,x,u) + \lambda^T(t) f(t,x,u). \quad (17)$$

Здесь $\lambda(t)$ — вспомогательная переменная, являющаяся решением дифференциального уравнения

$$\left.\begin{aligned} &\frac{d}{dt}\lambda(t) = -\left\{\frac{\partial H(t,x,\lambda,\ u)}{\partial x(t)}\right\}; \\ &\lambda(T) = \left\{\frac{\partial \Phi(x(T),T)}{\partial x(T)}\right\} \end{aligned}\right\}. \qquad (18)$$

Если ограничения на управление не эффективны, т. е. оптимальное управление достигается внутри области допустимых управлений (не находится на границах замыкания заданного множества допустимых управлений U), то

$$\frac{\partial H(t,x,\lambda,u)}{\partial u(t)} = 0. \qquad (19)$$

Если ограничения на управление эффективны, т. е. оптимальное управление достигается на границах области допустимых управлений U, то

$$H(t,x^0,\lambda,u^0) = \min_{u(t)\in U} H(t,x^0,\lambda,u),\ t \in [t_0,T]. \quad (20)$$

Таким образом, оптимальное управление выбирается из условия

$$u^0(t) = \arg\min_{u\in U} H(x^0,u,\lambda,t). \qquad (21)$$

Условия оптимальности, сформулированные в виде двухточечной краевой задачи (15), (18) и условий выбора управления (19) и (20), являются необходимыми условиями минимума функционала (16).

В общем случае область изменений управляющих воздействий U является ограниченной. В соответствии с принципом минимума Понтрягина стационарная траектория может содержать дуги, вдоль которых вектор управления принадлежит границе U. С помощью операции, предложенной Фрайесом де Ведеком [7], можно перейти к открытой области изменения управлений. Эта операция состоит в замене вектора $u(t)$ функцией другого вектора, не ограниченного во всем R^n.

Продифференцировав $H(x, u, \lambda, t)$ по времени, с учётом возможности перехода к открытой области управляющих воздействий, получим

$$\frac{d}{dt}H(x,u,\lambda,t) = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x}\frac{dx}{dt} + \frac{\partial H}{\partial \lambda}\frac{d\lambda}{dt} + \frac{\partial H}{\partial u}\frac{du}{dt}.$$

Учитывая, что дифференциальные уравнения (15) и (18) образуют каноническую форму, а также, что $\frac{\partial H}{\partial u}\frac{du}{dt}=0$ (либо $\frac{\partial H}{\partial u}=0$, либо $\frac{du}{dt}=0$, либо $\frac{\partial H}{\partial u}$ и $\frac{du}{dt}$ — ортогональны), последнее выражение можно переписать в виде

$$\frac{d}{dt}H(x,u,\lambda,t)=\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial t}. \qquad (22)$$

Очевидно, что поведение гамильтониана при оптимальном управлении принимает вполне определённую траекторию, определяемую решением дифференциального уравнения с краевым условием в правой части. Это поведение положим в основу конструкции алгоритмов оптимизации системы управления.

Запишем необходимые условия минимума функционала качества, выраженные в поведении гамильтониана на оптимальной траектории, в виде

$$\Re^0(t)=H^0(t)+\phi(t)=0. \qquad (23)$$

Рассмотрим сначала случай, когда $p = k$, и с помощью параметров $a(t)$ предполагается парировать соответствующие параметрические возмущения, т. е. предполагается, что возможно достижение следующего соотношения:

$$a(t)=\eta(t). \qquad (24)$$

При выполнении соотношения (24) уравнение объекта (15) будет иметь вид

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d}{dt}x(t)=f(x,u,t)\\&x(t_0)=x_0\end{aligned}\right\}. \qquad (25)$$

Если функционал $J(x, u, t)$ гладкий, то оптимальное управление $u^0(t)$ при выполнении соотношения (24) для объекта (25) обеспечивает выполнение уравнения Гамильтона—Якоби

$$\frac{\partial J(x,t)}{\partial t}+H\left[x(t),u\left\{x(t),\frac{\partial J(x,t)}{\partial x(t)}\right\},\lambda(t),t\right]=0 \qquad (26)$$

с граничным условием

$$J(x,t)=0 \text{ при } \Phi(x(t),t)=0. \qquad (27)$$

Данное уравнение описывает поведение функционала $J(x, u, t)$ вдоль траектории $x(t)$ этой системы. Таким образом, независимо от того, какое управление $u(t)$ приводит к заданной области краевых значений состояния системы, функционал должен удовлетворять уравнению (26).

Пусть $\alpha(t)=\eta(t)$, $u^0(t)=u\left\{x^0(t),\frac{\partial J(x^0,t)}{\partial x^0(t)}\right\}$ — оптимальное управление и $J^0 = (x^0, t)$ — оптимальная поверхность функционала. Тогда из уравнения Гамильтона—Якоби получим

$$\begin{aligned}&\frac{\partial J(x^0,t)}{\partial t}=\\&=-H\left[x^0(t),u\left\{x^0(t),\frac{\partial J(x^0,t)}{\partial x^0(t)}\right\},\lambda(t),t\right].\end{aligned} \qquad (28)$$

Для случая когда $\alpha(t)\neq\eta(t)$, управления $u(t)=u\left\{x(t),\frac{\partial J(x,t)}{\partial x(t)}\right\}$, уравнение Гамильтона—Якоби будет иметь вид

$$\begin{aligned}&\frac{\partial J(x,t)}{\partial t}+\frac{\partial J(x,t)}{\partial\eta}\frac{d}{dt}\eta(t)+\frac{\partial J(x,t)}{\partial\alpha}\frac{d}{dt}\alpha(t)=\\&=-H\left[x(t),u\left\{x(t),\frac{\partial J(x,t)}{\partial x(t)}\right\},\lambda(t),t\right]=0.\end{aligned} \qquad (29)$$

Учитывая, что $u^0(t)=u\left\{x^0(t),\frac{\partial J(x^0,t)}{\partial x^0(t)}\right\}$, является H-минимальным управлением, т. е.

$$\begin{aligned}&H\left[x^0(t),u\left\{x^0(t),\frac{\partial J(x^0,t)}{\partial x^0(t)}\right\},\lambda(t),t\right]\leqslant\\&\leqslant H\left[x^0(t),u\left\{x(t),\frac{\partial J(x,t)}{\partial x(t)}\right\},\lambda(t),t\right].\end{aligned}$$

Сравнивая левые части уравнений (28) и (29), получим следующее условие:

$$\frac{\partial J(x,t)}{\partial t}\frac{d}{dt}\eta(t)+\frac{\partial J(x,t)}{\partial t}\frac{d}{dt}\alpha(t)\leqslant 0, \qquad (30)$$

так как $\frac{\partial J(x^0,t)}{\partial t}=\frac{\partial J(x,t)}{\partial t}$.

Назначим алгоритм, «парирующий» параметрические возмущения $\eta(t)$, в виде

$$\left.\begin{aligned}&\frac{d}{d}\alpha(t)=-\frac{\partial J(x,t)}{\partial\alpha(t)};\\&\alpha(t_0)=\alpha_0\end{aligned}\right\}. \qquad (31)$$

Используя неравенство (30), можно получить условие на максимально возможную скорость изменения возмущенных параметров, при которой алгоритм (31) обеспечит асимптотические свойства процессу параметрической оптимизации. Подставляя алгоритм (31) в условие (30), получим

$$\left|\frac{\partial J(x,t)}{\partial \eta(t)}\frac{d}{dt}\eta^*(t)\right| < \left\|\frac{\partial J(x,t)}{\partial a(t)}\right\|^2, \; t \in [t_0, T], \quad (32)$$

где $\frac{d}{dt}\eta^*(t)$ — наибольшая скорость изменения возмущающих параметров.

Исследуем поведение гамильтониана на оптимальной траектории (23). Очевидно, что если $\alpha(t) \neq \eta(t)$, то равенство (23) выполняться не будет, т. е. $\Re(t) = H(x,u,\lambda,t) + \phi(t) \neq 0$. Это обстоятельство положим в основу алгоритмов оптимизации. Введём в процесс рассмотрения функцию Ляпунова

$$V = \frac{1}{2}\left\{\Re(x,u,\lambda,t) - \Re(x^0,u^0,\lambda,t)\right\}^2 = \\ = \frac{1}{2}\left\{\Re(x,u,\lambda,t)\right\}^2. \quad (33)$$

Тогда

$$\frac{d}{dt}V = \Re\left\{\frac{\partial H}{\partial \eta(t)}\frac{d}{dt}\eta(t) + \frac{\partial H}{\partial \alpha(t)}\frac{d}{dt}\alpha(t)\right\} \leqslant 0, \quad (34)$$

так как $\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H^0}{\partial t}$, $\frac{\partial \phi(t)}{\partial \eta(t)} = 0$ и $\frac{\partial \phi(t)}{\partial \alpha(t)} = 0$.

Пусть алгоритм параметрической оптимизации имеет вид

$$\frac{d}{dt}\alpha(t) = -\left\{\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial \alpha(t)}\right\}^T \Re(t). \quad (35)$$

Тогда неравенство (19) примет вид

$$\Re\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial \eta(t)}\frac{d}{dt}\eta(t) - \\ - \Re^2\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial a(t)}\left\{\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial a(t)}\right\}^T \leqslant 0. \quad (36)$$

Из последнего неравенства следует, что параметрическая оптимизация будет успешной, если будет выполняться следующее неравенство:

$$\Re\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial \eta(t)}\frac{d}{dt}\eta(t) - \\ - \Re^2\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial a(t)}\left\{\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial a(t)}\right\}^T < 0.$$

Назначение алгоритма параметрической оптимизации (35) позволит получить условие успешной параметрической оптимизации:

$$\left\|\Re(t)\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial a(t)}\right\|^2 > \left|\frac{\partial H(x,u,\lambda,t)}{\partial \eta(t)}\frac{d}{dt}\eta^*(t)\right|, \quad (37)$$

$t \in [t_0, T]$,

где $\frac{d}{dt}\eta^*(t)$ — максимальное значение скорости изменения параметров, подвергающихся возмущениям.

Таким образом, получен алгоритм управления с идентификацией нестационарных составляющих матрицы ***K***. В отличие от алгоритма управления без идентификации, при синтезе управления использован не редуцированный функционал, а полный квадратичный функционал (16).

Результаты математического моделирования. Эффективность разработанного подхода алгоритмической оптимизации продемонстрируем с помощью математического моделирования погрешностей корректируемой ИНС ЛА.

Результаты математического моделирования процесса идентификации параметров регулятора системы коррекции ИНС с помощью алгоритма оптимизации (35) представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из графиков, разработанный метод параметрической оптимизации успешно работает. Оптимизация системы управления проведена с помощью вычисления реальных параметров a_y и μ, которые используются в матрице регулятора, принимают некоторые фиксированные значения, соответствующие текущей ситуации и режиму полёта ЛА.

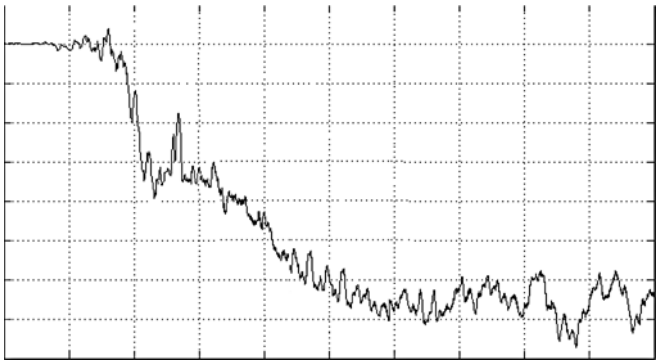


Рис. 2. Настройка параметра a_y

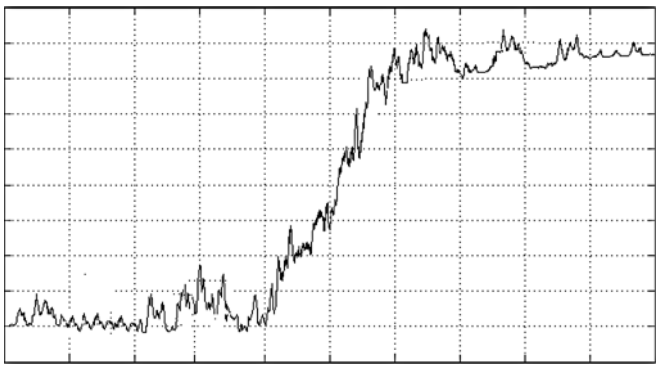


Рис. 3. Настройка параметра μ

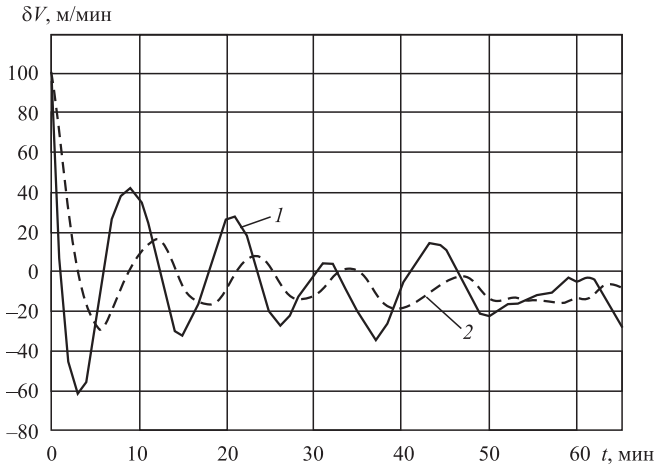


Рис. 4. Погрешности ИНС в определении скорости при коррекции в структуре системы:
1 — погрешности ИНС с нестационарным алгоритмом управления в условиях параметрической неопределённости; *2* — погрешности ИНС с регулятором и алгоритмом оптимизаци

На рис. 4 представлены результаты моделирования погрешности ИНС в определении скорости ЛА при использовании регулятора для коррекции в структуре системы.

Как видно из рис. 4, применение разработанного алгоритма оптимизации позволяет уменьшить погрешности ИНС, что приводит к повышению точности навигационных определений.

С помощью представленного алгоритма с оптимизацией параметров компенсируются ошибки ИНС по скорости и углы отклонения ГСП от плоскости горизонта за счёт оптимизации нестационарных параметров матрицы модели алгоритма управления.

Заключение. Сформулированы условия процесса оптимизации, обеспечивающие перевод функционала качества из его периферийных значений в минимум асимптотически.

Таким образом, основываясь на методе алгоритмического конструирования, разработан алгоритм оптимизации нестационарных систем управления с квадратичным функционалом качества в условиях неполной априорной информации. В основу разработанного алгоритма положены уравнение Гамильтона—Якоби и принцип минимума Понтрягина. Получены условия успешной оптимизации систем, записанные в виде неравенств. Результаты моделирования погрешностей ИНС с разработанным алгоритмом управления подтвердили его эффективность.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-8-00522).

Библиографические ссылки

1. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 500 с.
2. **Бабиченко А.В., Шкред В.К.** Основные погрешности инерциальных навигационных систем // Инженерная физика. 2011. № 11. С. 33—52.
3. **Джанджгава Г.И., Голиков В.П., Шкред В.К.** Алгоритмы обработки информации серийных самолетных платформенных инерциальных навигационных систем // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 11. С. 4—11.
4. **Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А.** Навигационный комплекс // Патент России № 2016383. 1994. Бюл. № 13.
5. **Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А.** Синтез адаптивного регулятора инерциальной навигационной системы // Техническая кибернетика. № 2. 1992. С. 19—24.
6. **Алексеев В.М., Тихомиров В.М., Фомин С.В.** Оптимальное управление. М.: Наука, 1979. 325 с.
7. **Анрион Р.** Теория второй вариации и её приложения в оптимальном управлении. М.: Наука, 1979. 176 с.
8. **Афанасьев В.Н.** Управление неопределёнными динамическими объектами. М.: Наука, 2008. 208 с.

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 30.01.2018.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 22.03.2018.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	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