

# Автоматизация. Современные Технологии

#### ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Микрин Е.А.	– д.т.н., проф., академик РАН,
_	ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёв
РЕДАКЦИОННА	
Афанасьев В.Н.	– д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ
Ван Мэйлин	– д.т.н., проф., Пекинский
Иванов А.П.	политехн. ун-т (КНР)
	- д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Кларк Р.	<ul><li>– д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)</li></ul>
Криони Н.К.	– д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
криони 11.к. Кузнецов А.Е.	– д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа) – д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
мальцева С.В.	– д.т.н., проф., НТТТУ (т. Тязаны) – 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.фм.н., ИРЭ РАН
нефедов 2.11. Никифоров В.М.	
тикифоров вил.	им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В	<ul> <li>д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана</li> </ul>
Путилов В.Н.	<ul> <li>– ООО «Изд-во "Инновационное</li> </ul>
	машиностроение"» (заместитель
	главного редактора)
Румянцева О.Н.	- генеральный директор ООО «Изд-ве
~ IO	"Инновационное машиностроение"» – д.т.н., проф., Пекинский
Ся Юаньцин	политехн. ун-т (КНР)
<b>Љ</b> у Ли	– д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Рёдоров И.Б.	– д.т.н., проф., академик РАН,
r ogopos mis.	президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Кэ Юн	– д.т.н., проф., Нанкинский ун-т
20 2011	науки и технологии (КНР)
<b>Шахнов В.А.</b>	– 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.	<ul><li>д.э.н., проф., Кошалинский</li></ul>
	политехн. ин-т (Польша)
Редакторы — <b>Мь</b>	<b>мрина И.Н., Селихова Е.А.</b>
Компьютерная в	ёрстка — <b>Конова Е.В.</b>
	•
Адрес редакц	ии:
107076, Москва,	Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.
T 17/400\ 2/0	_41_77
Тел.: +7(499) 268 E-mail: ast@masl http://www.mash	nin.ru; astmashin@yandex.ru;

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

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 Россий-

Учредитель:

Издаётся с 1947 г.

Том 72

6 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

# АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Мирошникова В.Д., Шугалов А.В., Мирошникова Т.Д. Построение структурно-компоновочных решений гибких производственных систем на основе АТНС «Вертикаль»	3
Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М., Колчин П.В. Управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств на основе искусственного интеллекта и облачных технологий	2
<b>Ерохин В.В.</b> Оптимальное управление технологическим процессом на базе станка с ЧПУ	0
Амелькина С.А., Амелькин Э.А., Дупленкова К.А., Микаева С.А. Проект освещения квартала г. Саранск светодиодными светильниками	5

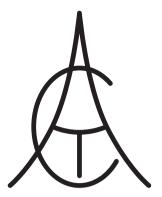
#### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

По страницам журналов.....

CO	DELMICITIBLE TEXTIONOLVIA	
<b>рис</b> е	крин Е.А., Комаров М.В., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Боенко Н.Ю. Ковариационное управление стабилизацией граммной траектории облёта при сближении космических аратов	268
ко <i>А</i> пери дол,	шгенс А.Г., Дружинин О.В., Карлин В.С., Корнушен- А.В., Кудрявцев О.В., Павленко О.В. Численные и экс- иментальные исследования влияния поворота мотогон- установленных на конце крыла, на аэродинамические актеристики летательного аппарата	273
	банов Г.П. Автоматизация процесса кодирования и раснавания графической документации	280
ОБ	ЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ	

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





# Automation. Modern

#### MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

<b>Chief in Editor</b>	
Mikrin E.A.	- dr.en.s., prof., academician of the RAS,
	RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev
EDITORIAL COU	
Afanasyev V.N.	- dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Wang Meiling	<ul><li>Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China</li></ul>
Ivanov A.P.	- dr.ec.s., prof., MSURE (MIIT)
Clark R.	– Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K.	– dr.en.s., prof., USATU, Ufa
<b>Kuznetsov A.E.</b>	- 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.	<ul><li>dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman</li></ul>
Nefedov E.I.	– dr.phm.s., IRE RAS
Nikiforov V.M.	<ul> <li>dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP behalf N.A. Pilyugin»</li> </ul>
Proletarskiy A.V.	<ul><li>dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman</li></ul>
Putilov V.N.	<ul> <li>LLC «Publishing "Innovative machine building"» (deputy chief editor)</li> </ul>
Rumyantseva O.N.	. – General Director of LLC «Publishing "Innovative mashine building"»
Xia Yuantsin	<ul> <li>Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,</li> <li>P.R. China</li> </ul>
Fu Li	- Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B.	<ul> <li>dr.en.s., prof., academician RAS, President of MSTU behalf of N.E. Bauman</li> </ul>
He Yung	- Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science
Shakhnov V.A.	and Technology, P.R. China – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,
SHAKIHOV V.A.	MSTU behalf of N.E. Bauman
Shibanov G.P.	<ul> <li>dr.en.s., prof., State Flight Test Center behalf of V.P. Chkalov</li> </ul>
Yanovich E.A.	<ul> <li>dr.ec.s., prof., Koszalin Polytechnic.</li> <li>Inst., Poland</li> </ul>
Editors — Mymrin	a I.N., Selikhova E.A.
Computer layout –	
mp arei injout	
Editorial addr	066*
107076. Moscow.	Kolodezny lane – 2a, build. 2
Tel.: +7(499) 268	-41-77.
E-mail: ast@masl http://www.mash	hin.ru; astmashin@yandex.ru;
Founder:	III. U
LLC «SCIENTIFIC	AND TECHNICAL PUBLISHING
	CHINE BUILDING"»
The iournal was red	sistered in the Roskomnadzor on May 29, 2014

(PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the

Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the

Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

# Volume 72 $\frac{6}{2018}$

#### CONTENTS

<b>AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEAR</b>	CH
AND PRODUCTION PROCESSES	

Miroshnikova V.D., Shugalov A.V., Miroshnikova T.D. Construction of structural-layout solutions for flexible production systems 

Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A., Kyzmishina A.M., Kolchin P.V. Management of the enterprise technological equipment in conditions of digital production on the basis of artificial intellect and cloud technologies	
<b>Erokhin V.V.</b> Optimum control of the technological process on the basis of the CNC machine	
Amelkina S.A., Amelkin E.A., Duplenkova K.A., Mikaeva S.A. Lighting project of the quarter in Saransk with LED lights	
MODERN TECHNOLOGIES	
Mikrin E.A., Komarov M.V., Zubov N.E., Ryabchenko V.N., Borisenko N.Yu. Covariance control of the program trial flight path stabilization during the approach of spacecraft	
Byushgens A.G., Druzhinin O.V., Karlin V.S., Kornushenko A.V., Kudryavtsev O.V., Pavlenko O.V. Numerical and experimental studies of influence of rotation of the motonacelles, installed on the wing end, on the aerodynamic characteristics of the aircraft	
<b>Shibanov G.P.</b> The coding and recognition processes automation of graphic documentation	
SURVEY OF PERIODICALS	
Periodical review	288

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





## АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.01

**В.Д. Мирошникова,** канд. техн. наук, **А.В. Шугалов, Т.Д. Мирошникова,** канд. экон. наук, доц. (Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых)

tavem@ezhka.elcom.ru

# ПОСТРОЕНИЕ СТРУКТУРНО-КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ГИБКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ АТНС «ВЕРТИКАЛЬ»

Представлено решение задач целенаправленного анализа и синтеза признаков автоматизированных транспортно-накопительных систем (АТНС) в целях получения систем с требуемыми свойствами. Сравнительный анализ признаков проводится на качественном уровне, по количественным показателям, а также на уровне структурно-кинематических формул грузонесущих поверхностей устройств хранения (накопления). Отобраны перспективные признаки. На основе АТНС с новой, запатентованной композицией признаков и определяемых ими свойств представлено построение линейно-узловых структурно-компоновочных решений гибких производственных систем (ГПС).

**Ключевые слова:** гибкая производственная система; структурно-компоновочное решение; признаки строения; потребительские свойства; производительность; гибкость; вместимость; грузообмен.

The problems solution of purposeful analysis and synthesis signs for the automated transport — accumulation system (ATAS) is presented, in or der to obtain systems with the required properties. Comparative analysis of criterions is carried out at a qualitative level, by quantitative indicators, and a lso at the level of structural-kinematic formulas of the storage devices load-bearing surfaces (accumulation). Prospective criterions are selected. The construction of linear-node structural and structural-layout solutions for flexible production systems (FPS) are presented based on the ATAS with a new, patented criterions composition and properties determined by them.

**Keywords:** f lexible p roduction s ystem; s tructural-layout s olution; s tructural cr iterions; c onsumer properties; productivity; flexibility; capacity; freight exchange.

Структурно-компоновочное решение (СКР) является важнейшей характеристикой ГПС, на основе которой формируется базовый комплекс их свойств, включающий технологические возможности, маршрутизацию грузов, производительность, гибкость, ресурсоёмкость и др. [1]. При построении СКР к АТНС предъявляются требования по формированию пространственно-временных характеристик ГПС. В основе их реализации лежит решение задач грузообмена, которое, в частности, должно предусматривать:

использование конструкций из относительно несложных, но многофункциональных компонентов, допускающих трансформацию СКР в процессе эксплуатации ГПС;

повышение эффективности операций грузообмена за счёт увеличения количества одновременно передаваемых грузов с сохранением их адресных позиций (АП);

снижение времени доступа к  $A\Pi$ , а также количества операций по передаче грузов.

Решения по реализации требований к ATHC различны по своей эффективности и требуют проведения глубокого анализа.

В целях выявления новых возможностей АТНС для создания ГПС с указанным комплексом свойств были поставлены следующие задачи:

определение факторов АТНС, в наибольшей степени оказывающих влияние на возможности маршрутизации грузов, производительность, гибкость и ресурсоёмкость ГПС;

анализ СКР ГПС для отбора признаков АТНС, перспективных с точки зрения улучшения контролируемых свойств: выявление особенностей построения, состава признаков СКР ГПС, на основе которого получены потребительские свойства; установление взаимосвязи признаков с получаемыми на их основе свойствами; оценка преимуществ, обеспечиваемых анализируемыми признаками, и их побочных проявлений;

конструирование и сопряжение признаков ATHC, сохраняющих преимущества и снижающих проявление побочных действий;

представление вариантов технического решения задачи и конструктивной реализации новой композиции признаков ATHC;

представление СКР ГПС на основе полученных признаков и их анализа.



Решение поставленных задач проводилось в рамках концепции элементарных признаков строения устройств хранения (накопления) — УХ(Н) с использованием процедуры пошаговой структуризации, методики анализа признаков технических объектов, процедуры конструирования признаков технического решения [2], моделей теории массового обслуживания и кинематического способа задания поверхностей.

В качестве фактора АТНС, обладающего возможностями системного воздействия на широкий спектр потребительских свойств ГПС, следует указать эффективность построения процессов грузообмена как на внешних, так и на внутренних связях системы. В достижении высокого технического результата лидируют решения с более эффективными вариантами грузообмена. Доказательная база представлена процедурой и результатами сравнительного анализа ГПС с поштучным способом грузообмена. Их отбор не представлял сложности: две исходные морфологические формы, антиподы по принципам

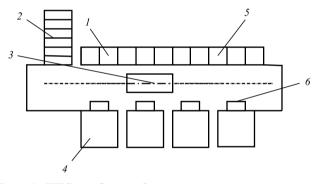


Рис. 1. ГПС на базе роботизированной складской системы:

1 — стеллажный склад; 2 — перегрузочное устройство; 3 — складской робот; 4 — гибкие производственные модули; 5 — стеллаж; 6 — приёмо-перегрузочные устройства

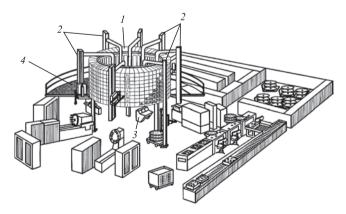


Рис. 2. Интегрированная производственная система Rota FZ-125:

1 — автоматический магазин деталей (I...IX — номера секций); 2 — манипуляторы для подачи деталей к станкам; 3 — пульт управления; 4 — автоматический захват

грузообмена, компоновке и, соответственно, возможностям были очевидны (рис. 1 и 2). Первое решение — ГПС на базе складской системы со стеллажом, обслуживаемым роботом (роботизированная складская система — РСС). Выбор решения определён высокой частотой его применения. Стеллажи ячеистой конструкции, обслуживаемые роботами или кранами-штабелёрами, составляют ву большинства типовых компоновок ГПС. Второе решение — интегрированная производственная система Rota FZ-125 с роторным накопителем — оригинальное решение по организации коротких гибких транспортных связей. По времени ожидания обслуживания это одна из лучших систем: простои технологического оборудования в ожидании обслуживания практически отсутствуют. В своём роде это единственное решение: аналоги системы Rota в среде ГПС не были обнаружены.

Сравнительный анализ ГПС проводился на качественном уровне, по количественным показателям, на уровне структурно-кинематических формул грузонесущих поверхностей (ГРП). Его результаты представлены поэтапно.

1. Сравнительный анализ вариантов ГПС на качественном уровне. В ГПС на базе РСС (см. рис. 1) технологическое оборудование размещено вдоль грузонесущей поверхности стеллажа. Между ними смонтированы робот и приёмо-передающие устройства (ППУ). Робот обеспечивает индивидуализацию маршрутов. Конструкция ГРП и алгоритм управления поиском АП в её условиях сравнительно просты. Стеллажные конструкции компактны. Коэффициент использования полезной площади близок к единице. Благодаря названным преимуществам гибкие производства на их базе получили наиболее широкое распространение. Существенный недостаток заключается в том, что ГРП статична. Грузообмен ресурсозатратен. Наиболее продолжительной по времени является отработка координатных перемещений исполнительных механизмов относительно осей X и Y. При поиске одной АП в цикле вынуждены участвовать остальные ячейки ГРП устройства хранения. Для типового решения робото-складского комплекса, оснащённого двумя стеллажами, вместимость одного стеллажа, в зависимости от исполнения, составляет от 656 до 1590 шт. Предоставляемая данными устройствами возможность индивидуализации маршрутов обеспечивается высокими затратами времени и электроэнергии. При вместимости стеллажа Wколичество передаваемых грузов Р могло бы изменяться в пределах  $1 \le P \le W$ . Вместе с тем

грузообмен поштучный — на нижнем пределе возможностей (P=1). Ячеистые стеллажи с роботами или кранами-штабелёрами — это довольно массивные системы с большими запасами. Грузы, масса которых не превышает нескольких килограмм, перемещает устройство в несколько тонн. Следует также указать низкую функциональную нагрузку на компоненты, формирующие PCC.

Интегрированная производственная система Rota FZ-125 по эффективности грузообмена продолжительное время оставалась вне конкуренции. Система была предназначена для обработки деталей типа «тела вращения» диаметром до 125 мм малыми сериями. При программе выпуска 135 тыс. изделий в год, число серий изменялось в пределах от 500 до 1500. СКР системы основано на использовании семи станков с ЧПУ, работающих в режиме взаимодополнения, смонтированных вокруг автоматически действующей системы централизованного накопления и транспортирования. У каждого из станков размещены пристаночные накопители. Размещённый в центре накопитель-ротор вместимостью W = 540 шт. оборудован подъёмниками. Его диаметр, равный 6 м, определяется длиной технологического грузопотока. Накопитель состоит из девяти, смонтированных одно над другим, колец, автономно вращающихся по заданной программе. Движущиеся над станками кольца одновременно служат и накопителями, и механизмами для многоканальной транспортировки заготовок, деталей, межоперационного задела по кольцевой части маршрута. Они являются элементами системы, характеризующими её маршрутную гибкость. Данные свойства обеспечивают особенности морфологии накопителя: наличие параллельных каналов обслуживания (транспортных колец). Заявку на передачу заготовки к станку выполняет сначала кольцо накопителя, реализующее поворот вокруг оси У, груз по кольцевому маршруту перемещается к подъёмнику, затем подъёмник реализует прямолинейное перемещение, параллельное оси Y, спуская заготовку, после чего она передаётся в пристаночный накопитель. Время ожидания обслуживания минимизируется за счёт использования в первой фазе обслуживания семи каналов обслуживания (из девяти транспортных колец семь задействованы на межстаночном перемещении грузов), во второй пяти каналов. К недостаткам рассматриваемой ГПС относится нежелательный эффект, сопутствующий динамичным условиям хранения грузов: при доставке одной заготовки

или детали вместе с ней по транспортному кольцу в принудительном порядке перемещаются все остальные, что значительно повышает энергозатратность поиска. Каждое транспортное кольцо включает до 60 АП. ГРП накопителя динамично организована, развита в соответствии с формой и размерами профиля технологической системы, но какие-либо трансформации её элементов не просматриваются. Кольцевой профиль системы Rota FZ-125 не является перспективным для использования в целях увеличения количества технологического оборудования. Он даёт рыхлую структуру с низким значением коэффициента использования производственной плошади. При этом создаваемый в ней текущий запас грузов довольно велик. В большей степени он продиктован реализацией принципов многоканального обслуживания заявок с участием накопителя. В этом случае созданная ячеистая структура заполняется излишними запасами грузов. Образование эффективных связей между гибкими производственными участками, имеющими в основе своей композиции кольцевые накопители данной конструкции, проблемно.

Следует указать на наличие общих недостатков двух сравниваемых систем: грузообмен в обоих решениях включает большое количество передач, а трансформации СКР в процессе эксплуатации ГПС не предусмотрены.

- 2. Сравнительный анализ вариантов ATHC ГПС по количественным показателям. Расчёт времени цикла работы исполнительных устройств в ИПС Rota FZ-125 и ГПС на базе РСС приведён в табл. 1, а расчёт показателей эффективности работы ИПС Rota FZ-125 и ГПС на базе РСС в табл. 2.
- 3. Сравнительный анализ структурно-кинематических формул ГРП УХ(Н) ИПС Rota FZ-125 и ГПС на базе PCC. Рассмотрим решения АТНС с позиций теории строения ГРП [2] на уровне их структурно-кинематических определителей. Они позволяют раскрыть компоненты ГРП, на основе которых были получены её свойства и соответствующий ряд свойств АТНС.

Структура ГРП обладает свойством периодизации. В частности, её образующие изменяются с переходом на новый уровень интеграции. Образующая (структурная единица) n-го уровня представляет собой определённым способом интегрированную совокупность структурных единиц (n-1)-уровня. ГРП как стеллажа, так и накопителя-ротора относятся к УХ(H) II уровня интеграции. У каждой из них в представленных ниже формулах строения







Таблица 1 Расчёт времени цикла работы исполнительных устройств в ИПС Rota FZ-125 и ГПС на базе РСС

Величина	Rota FZ-125	ГПС на базе РСС
Исходные данные: габаритные размеры ячейки, мм: длина стеллажа <i>L</i> , мм длина окружности накопителя-ротора высота УХ(H) <i>H</i> , мм радиус УХ(H) <i>R</i> , мм	300 × 300 × 300 — 18 000 3000 3000	300 × 300 × 300 18 000 — 3000
Функции поиска адресной позиции выполняют: по оси $Y$ по оси $X$ круговые перемещения АП в горизонтальной плоскости относительно оси $YW_y$	Манипулятор — Кольцевые секции склада-накопителя	Робот Робот
Скорость координатных перемещений: по оси $Y$ , м/с по оси $X$ , м/с относительно оси $Y$	0,15 — 1	0,5 0,5 —
Время выполнения координатных перемещений:	c	c
по оси $Y t_y$ , с по программе «ИП—АП» (ИП — исходная позиция) по программе «ИП—АП—ИП» повороты относительно оси $Y$	$t_{y_1} = \frac{S_y}{V_y} = \frac{3 \text{ M}}{0,15 \text{ M/c}} = 20 \text{ c}$ $S_y = H$ $t_{y_2} = 2 \cdot 20 = 40 \text{ c}$ $t_{w_y} = \frac{N}{v},$ где $N$ — число оборотов складанакопителя; $v$ — частота вращения; $v = \frac{\omega}{2\pi},$ где $\omega$ — угловая скорость, $\omega = \frac{V_x}{R}, \ \omega = 1 \text{ M/c/3 M} = 1/3 \text{ рад/c};$	$t_{y_1} = \frac{S_y}{V_y} = \frac{3 \text{ M}}{0.5 \text{ M/c}} = 6 \text{ c}$ $S_y = H$ $t_{y_2} = 2 \cdot 6 = 12 \text{ c}$
по оси Х	$v = \frac{1}{3}$ рад/с $\cdot \frac{1}{2\pi} = 0.053$ (1/c); $t_{w_y} = 1/0.053 = 18.86 \approx 19$ с	$t_{x_1} = \frac{S_x}{V_x} = \frac{18 \text{ M}}{0.5 \text{ M/c}} = 36 \text{ c};$ $t_{x_2} = 72 \text{ c}$
Время цикла	$t = t_y + t_{w_y} + t_{c-c} = 40 + 19 = 59 \text{ c} + t_{c-c},$ где $t_{c-c}$ — время перемещений между складом и станком	$t = \max\{t_x, t_y\} + t_{c-c} = $ = 72 c + $t_{c-c}$ , MИН

Примечания: 1. Расчёт ведётся только по вариативным слагаемым времени цикла. Время пауз ввода-вывода захвата не учитывается.

- 2. Расчёт производился в условиях равноускоренных перемещений.
- 3. Значения по РСС даются в сопоставимом с системой Rota виде.

присутствуют две образующие, которые указаны в круглых скобках в геометрической части определителя. В квадратных скобках указана алгоритмическая часть, которая включает перемещения образующей на уровне интеграции. При представлении компонентов ГРП введены следующие сокращения: YRI = j - j-й уровень интеграции;  $O_{YRI} = j$  — образующая j-го уров-

ня интеграции;  $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{W}_Y(\phi)$  — векторы перемещения образующей на уровне интеграции. В определителе переходы на следующий уровень интеграции обозначены стрелками.

Структурно-кинематическая формула ГРП РСС:

$$YR \quad I = II; (O_{YRI=1})[E\vec{X}] \to (O_{YRI=11})[F\vec{Y}].$$







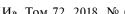
#### Таблица 2

### Расчёт показателей эффективности работы ИПС Rota FZ-125 и ГПС на базе РСС

Расчёт показателей эффективности работы	ИПС Rota FZ-125 и ГПС на базе РСС			
Исходные данные и расчёт	значений показателей			
1. Интегральная производствен	иная система Rota FZ-125			
Фазы обслуж	ивания			
Первая фаза	Вторая фаза			
Исходные данные: $T_{\text{oбp}} = 2$ мин; $n_1 = 7$ ; $T_{\text{обс}n_1} = 19$ с	Исходные данные: $n_2 = 5$ ; $T_{\text{обсл}_2} = 40 \text{ c}$			
Интенсивность обслуживания заявок, шт./ч				
$\mu_1 = \frac{60}{T_{\text{o6c}\pi_1}} = 0, \frac{60}{32} = 187, 5$	$\mu_2 = \frac{60}{T_{\text{o6cn}_2}} = \frac{60}{0,67} = 89,6$			
Интенсивность поступлен				
$\lambda_i = \frac{60}{T_{\text{ofp}}} = \frac{60}{2} = 30;  \lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{NS} \lambda_i = 210$	$\lambda_2 = 187,5$			
Коэффициент загрузки тр	анспортной системы			
$\rho_1 = \frac{\lambda_{\Sigma}}{n_1 \mu_1} = \frac{210}{7 \cdot 187, 5} = 0,16$	$\rho_2 = \frac{\lambda_{\Sigma}}{n_2 \mu_2} = \frac{187.5}{5 \cdot 89.6} = 0.4$			
Вероятность простоев тра	анспортной системы			
$P_{01} = \left[1 + \frac{\rho_1}{1!} + \frac{\rho_1^2}{2!} + \dots + \frac{\rho_1^{n_1}}{n_1!} + \frac{\rho_1^{n_1+1}}{n_1!(n_1 - \rho_1)}\right]^{-1} =$ $= \left[1 + 0.16 + \frac{0.16^2}{2} + \frac{0.16^3}{6} + \frac{0.16^4}{24} + \frac{0.16^5}{120} + $	$P_{02} = \left[1 + \frac{\rho_2}{1!} + \dots + \frac{\rho_2^{n_2}}{n_2!} + \frac{\rho_2^{n_2+1}}{n_2!(n_2 - \rho_2)}\right]^{-1} =$ $= \left[1 + 0.4 + \frac{0.4^2}{2} + \frac{0.4^3}{6} + \frac{0.4^4}{24} + \frac{0.4^5}{120} + \frac{0.4^6}{120(5 - 0.4)}\right]^{-1} = 0.6$			
$+\frac{0.16^6}{720} + \frac{0.16^7}{5040} + \frac{0.16^8}{5040(7-0.16)} \bigg]^{-1} = 0.85$	$-\left[1+0,4+\frac{2}{2}+\frac{6}{6}+\frac{24}{24}+\frac{120}{120}+\frac{120(5-0,4)}{120(5-0,4)}\right] = 0,0$			
Среднее число заяв	вок в очереди			
$N_{\text{ou}_1} = \frac{\rho_1^{n_1+1} P_{01}}{n_1 n_1! \left(1 - \frac{\rho_1}{n_1}\right)^2} = \frac{0.16^8 \cdot 0.85}{7 \cdot 40 \ 320 \left(1 - \frac{0.16}{7}\right)^2} = 0$	$N_{\text{o4}_2} = \frac{\rho_2^{n_2+1} P_{02}}{n_2 n_2! \left(1 - \frac{\rho_2}{n_2}\right)^2} = \frac{0.4^6 \cdot 0.6}{5 \cdot 120 \left(1 - \frac{0.4}{5}\right)^2} = 3 \cdot 10^{-6}$			
Число заявок в к	аждой фазе			
$N_{\Phi_1}=N_{{ m ou}_1}+K$ , где $K$ — среднее число занятых каналов, $K= ho;\;N_{\Phi_1}=N_{{ m ou}_1}+ ho_1=0+0,16=0,16$	$N_{\Phi_2} = N_{\text{ou}_2} + \rho_2 = 0 + 0, 4 = 0, 4$			
Среднее время ожидани				
$T_{\text{ou}_1} = \frac{\rho_1^{n_1} P_{01} 60}{n_1 n_1 ! \mu_1 \left(1 - \frac{\rho_1}{n_1}\right)^2} = \frac{0.16^7 \cdot 0.85 \cdot 60}{7 \cdot 7! \cdot 187.5 \left(1 - \frac{0.16}{7}\right)^2} = 0$	$T_{\text{o4}_2} = \frac{\rho_2^{n_2} P_{02} 60}{n_2 n_2! \mu_2 \left(1 - \frac{\rho_2}{n_2}\right)^2} = \frac{0, 4^5 \cdot 0, 6 \cdot 60}{5 \cdot 5! \cdot 89, 6 \left(1 - \frac{0, 4}{5}\right)^2} = 0$			
Среднее время нахожде	ния заявки в фазе			
$T_{\Phi_1} = T_{\text{oq}_1} + T_{\text{o6cn}_1} = 0 + 19 = 19 \text{ c}$	$T_{\Phi_2} = T_{\text{oq}_2} + T_{\text{o6cn}_2} = 0 + 40 = 40 \text{ c}$			
Среднее число заян	вок в системе			
$N_{\text{сист}} = N_{\Phi_1} + N_{\Phi_2} = 0$	0.16 + 0.4 = 0.56			
Среднее число заявок, находящи	ихся в очереди для системы			
$N_{\text{O4. CHCT}} = N_{\text{O4}_1}$	$+N_{\text{ou}_2}=0$			
Среднее время ожидания зая	вки в очереди в системе			
$T_{\text{ou. cuct}} = T_{\text{ou}_1}$	$+T_{\text{o4}_2} = 0$			
Среднее время ожидания	я заявки в системе			
$T_{ ext{cuct}} = T_{oldsymbol{\Phi}_1} + T_{oldsymbol{\Phi}_2} = 1$	19 + 40 = 59  c			







Окончание табл. 2

2. ГПС на базе склада стеллажной конструкции и робота
Однофазная система обслуживания
Исходные данные: $T_{\rm oбc} = 72 \text{ c} = 1.2 \text{ мин}$
Интенсивность обслуживания заявок, шт./ч
$\mu = \frac{60}{T_{\text{o6c}\pi}} = \frac{60}{1,2} = 50$
Интенсивность поступления заявок в систему
$\lambda_i = \frac{60}{T_{ m o6p}} = \frac{60}{2} = 30 \ { m mt./t}; \ \lambda_{\Sigma} = \Sigma \lambda_i = 210$
Коэффициент загрузки транспортной системы
$ ho = rac{\lambda_{\Sigma}}{\mu} = rac{210}{50} = 4.2 \gg 1$ — относительная загрузка АТНС превышает допустимую

Образующая І уровня — материальная точка: ячейка (АП), функция интегрирующего перемещения — прямолинейное размещение грузонесущих элементов. Количество дискретных перемещений E образующей в направлении оси Х ограничено длиной технологического грузопотока. Образующая І І уровня линия (в данном случае строка матрицы), Y — мультипликатор, его функции — дискретное, F-кратное, прямолинейное перемещение образующей в направлении оси У и распределяющее АП по высоте объёма хранения. Это приводит к образованию ГРП с матричным размещением грузонесущих элементов. Из решений II уровня интеграции варианты с данной комбинацией признаков дают самые высокие значения плотности укладки грузов и коэффициента использования полезной площади. В условиях поштучного грузообмена стеллажные конструкции не могут конкурировать с роторными в интенсивности грузообмена. Как показывают расчёты (см. табл. 1), РСС начинает серьёзно уступать уже на отработке горизонтальных координат (36 и 19 с), суммарное время обслуживания составляет 72 и 59 с соответственно, а относительная загрузка РСС превышает допустимую.

Структурно-кинематическую ГРП Rota FZ-125 можно записать следующим образом:

$$YR\ I = II;\ (O_{YRI=\:I})\ [G\vec{W_Y}] \rightarrow (O_{YRI=\:II})\ [F\vec{Y}].$$

Образующая І уровня — материальная точка: ячейка (АП), выбор интегрирующего перемещения  $W_{Y}$  решает две задачи: размещение грузонесущих элементов и реализация накопителем функции транспортирования.

Количество дискретных перемещений G образующей преимущественно определяется длиной технологического грузопотока. Система получает сильное расширение, коэффициент использования полезной плошади, занимаемой УХ(Н), составляет 0,2. Образующая II уровня — линия,  $F\vec{Y}$  — мультипликатор, решает две задачи: свёртка ГРП с использованием высоты объёма хранения и формирование многоканальной адресной системы обслуживания заявок. Число дискретных перемещений F формирует требуемое количество каналов обслуживания в первой фазе. Автономность каналам придаётся реализацией в конструкции признака «Подвижное соединение элементов». Каждый канал нагружен 60 АП. Показатели обслуживания заявок по данному решению высокие (см. табл. 1 и 2).

На базе рассмотренных решений представим один из вариантов конструирования новых признаков УХ(Н). Необходимость сохранения роторной составляющей  $\bar{W}_{\scriptscriptstyle Y}$  в композиции признаков УХ(Н) очевидна. Вместе с тем мультипликативная составляющая G не должна формироваться как функция длины технологического фронта. Более рационально представить её как функцию количества каналов обслуживания. В этом случае происходит её сжатие с G = 60 до G = 5...8. Трассы технологических грузопотоков должны прорисовываться другими композициями — более лёгкими и подвижными. Использование короткой прямолинейной компоненты FY в этих целях более рационально. В конструкцию она должна входить в сочетании с признаком «Подвижное соединение элементов» и включением на роторной составляющей  $W_{V}$ условия её размещения ф.





Структурно-кинематическая формула ГРП с новой совокупностью признаков:

$$YR \ I = II; (O_{YRI=I}) \ [\vec{Y}] \rightarrow (O_{YRI=II}) \ [\vec{W}_Y(\varphi)].$$

ATHC с новой совокупностью признаков устройства накопления получила название «Вертикаль».

Основой АТНС служит обойма, представляющая собой мобильный узел «получательраздатчик» грузов. Она может включать гру-

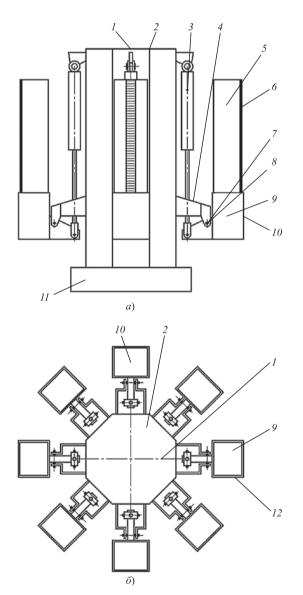


Рис. 3. Обойма в исходном положении с устройством выдвижения секций, выполненным в виде зубчатой передачи:

1— гибкая производственная система; 2— технологическое оборудование; 3— транспортно-накопительная система; 4— поворотная обойма; 5— зона доступа; 6— приёмо-передающее устройство; 7— промышленный робот; 8— адресные позиции; 9— корпус поворотной державки; 10— поворотные ячеистые секции; 11— поворотная державка; 12— боковые защёлки

зонесущие секции в виде столбцов, например, двух вариантов:

1) со структурно-кинематической формулой ГРП  $(O_{YRI=1})$   $[\vec{Y}]$ , интегрированные в поворотной части обоймы по формуле  $(O_{YRI=1I})$   $[\vec{W}_Y(\varphi)]$ ;

2) со структурно-кинематической формулой ГРП  $(O_{YRI=1})$   $[\vec{Y}]$ ,  $(O_{YRI=11})$   $[\vec{X}]$ , интегрированные в поворотной части обоймы по формуле  $(O_{YRI=111})$   $[\vec{W}_Y(\varphi)]$ .

Обойма в исходном положении показана на рис. 3, в раскрытом положении — на рис. 4.

Секции обоймы образованы вертикальным размещением грузонесущих ячеек — адресных позиций преимущественно в один или два столбца. Зона доступа в АП может быть развёрнута внутрь обоймы или находиться в боковой части каждой секции. Каж-

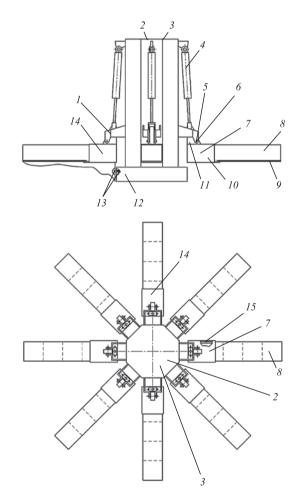


Рис. 4. Обойма в раскрытом положении:

1— концы скобы; 2— обойма; 3— транспортно-накопительная система; 4— шток гидропривода поворота; 5— соосные отверстия; 6— оси поворота; 7— корпус поворотной державки; 8— зона доступа; 9— рейка, смонтированная на внешней стороне секции; 10— державка; 11— пята державки; 12— привод поворота; 13— управляемое средство фиксации; 14— поворотные ячеистые секции; 15— боковые защёлки







дая секция установлена в корпусе поворотной державки с возможностью автономного поворота относительно оси поворота державки в горизонтальное положение и последующего выдвижения из корпуса. Обойма имеет возможность поворота в ряд установленных позиций, по количеству секций.

В конструкции обоймы реализован приншип пространственно-временной интеграции и дифференциации функций. Это позволило провести радикальные преобразования в функциональной организации грузообмена. Исключены лишние транспортные и передаточные функции. Выполнение многих функций упрощено, а части функций — совмещено. Впервые обойма одновременно может выполнять свои задачи в каждой точке ГПС своими отдельными секциями, блоком поворота или находиться в одном месте. В результате, в соответствии с задачами технологической среды, обойма может быстро распределить секции по требованиям, быстро их собрать и функционировать мобильно. Одновременно обойма выполняет функции и централизованного, и пристаночного накопителя. Небольшое время поворота при перемещении к технологическому оборудованию, виртуозность и лёгкость обеспечиваются малой вместимостью, малыми размерами и сравнительно большим объёмом передачи. В системе действует схема исключения простоев, предусматривающая как снижение интенсивности потока заявок, обеспечиваемое количеством передаваемых грузов, формированием резерва, так и повышение интенсивности обслуживания заявок за счёт активизации грузообмена.

В обойме редко присутствуют все секции, она целыми группами (в секциях) отсылает востребованные грузы. Её разгруженное состояние при выполнении разворотов, линейных перемещений положительно влияет на снижение энергозатрат. Это мобильный, динамичный узел « получатель-раздатчик»: получил и быстро отправил.

Обойма имеет вертикальное развитие. Радиус обоймы предельно сжат для формирования на её основе компактных АТНС с верхним развитием грузообмена и, соответственно, «узловых» или « линейно-узловых» структурнокомпоновочных схем ГПС. Это ведёт к комплексному улучшению пространственно-временных характеристик ГПС: рациональному использованию производственной площади, сокращению транспортных маршрутов, времени транспортирования и, соответственно, к снижению затрат энергии на каждом метре.

При обслуживании кольцевой секции системы Rota FZ-125 её вертикальная координа-

та при изъятии и укладке груза преобразуется в 60 подъёмов и спусков подъёмника. В предлагаемом решении одним поворотным движением державки одновременно перемещаем — «сбрасываем» на уровень расположения рабочей зоны станка все АП секции. Своей ячеистой структурой секция дифференцирует горизонтальные перемещения робота на малые шаги. Ему не надо отрабатывать длинную линейную координату. Таким образом, путём использования установочного поворотного перемещения секций недостаток переведён в преимущество.

На основе АТНС, построенной с использованием конструкций из относительно несложных, но многофункциональных компонентов, может быть сформирован ряд компактных линейно-узловых структурно-компоновочных схем, в том числе линейных, кольцевых, односторонних, двухсторонних, диагональных и комбинированных. При этом средства построения допускают последующую их трансформацию в процессе эксплуатации ГПС. Каждая обойма, стоящая около станка, — это по меньшей мере «шестивалентная, скоростная связь» с другими единицами технологического оборудования.

На базе данного решения технологическое оборудование может работать в различных режимах: взаимодополнения, взаимозаменяемости, автономном и комбинированном. На рис. 5—7 показаны варианты СКР систем и раскрыта их функциональная организация.

АТНС (см. рис. 5) имеет одну поворотную относительно вертикальной оси обойму и средства обмена грузами между обоймой и технологическим оборудованием: ППУ и промышленный робот. Накопитель обслуживает как внешние, так и внутренние грузопотоки, полностью выполняет функции доставки гру-

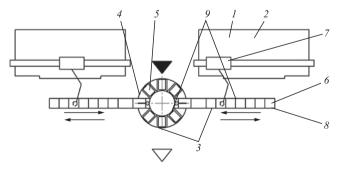


Рис. 5. ГПС с одной стационарной обоймой (вариант двухсторонней компоновки):

1— гибкая производственная система; 2— технологическое оборудование; 3— транспортно-накопительная система; 4— поворотная обойма; 5— секция; 6— приёмо-передающее устройство; 7— промышленный робот; 8— адресные позиции; 9— зона доступа







зов к станкам участка. Возможна реализация трёх режимов функционирования технологического оборудования. В режиме взаимодополнения обойма дополнительно реализует межстаночные связи путём поворота относительно вертикальной оси. Как показано на рис. 5, стационарная обойма обслуживает два станка, расположенных параллельно её боковым сторонам. При поступлении управляющего сигнала обойма с вертикально установленными ячеистыми секциями поворачивается относительно своей вертикальной оси в позицию передачи требуемой секции ППУ и стопорится в установленном положении. Затем производятся её поворот в горизонтальное положение и выдвижение. Секция полностью выдвигается из корпуса на ППУ. Грузообмен между обоймой и ППУ — групповой. По окончании передачи секции принадлежащая ей державка либо сохраняет занятое рабочее положение, либо переводится в исходное положение для возможности грузообмена обоймы с другим ППУ. После открывания затвора портальный робот получает доступ к размещённым в секции грузам: заготовкам и режущему инструменту.

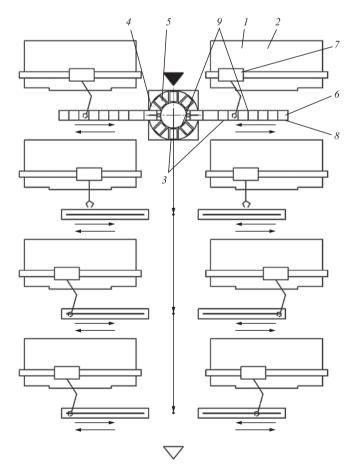


Рис. 6. Вариант ГПС с одной передвижной обоймой (вариант двухсторонней компоновки)

ГПС с одной передвижной обоймой (вариант двухсторонней компоновки) показан на рис. 6. Обойма выполняет функции хранения (накопления), кантования и транспортирования секций. Секция в обойме реализует функцию централизованного хранения (накопления), а находясь у станка, - функцию децентрализованного накопления. Возможна реализация четырёх режимов функционирования технологического оборудования. От предыдущих решений вариант отличается свободным перемещением обоймы по всему пространству, занимаемому ГПС. Она легко передвигается внутри системы с поднятым вверх вертикальными секциями грузом по узким транспортным магистралям, одновременно осуществляя повороты в заданные позиции, к каждой единице обслуживаемого оборудования. Разворачиваясь к ним, быстро распределяет, забирает секции и таким образом реализует групповой обмен грузами.

ГПС с тремя передвижными обоймами (вариант линейной композиции односторонней и двухсторонней компоновок) показан на рис. 7. Он отличается от решения, приведённого на рис. 6, функциональной организацией грузообмена. Функции между обоймами распределены следующим образом: первая обойма обслуживает входящий в ГПС грузопоток, вторая — межстаночные связи между технологическим оборудованием первой и второй линии, а также грузопоток, входящий на вторую линию с внешней связи, третья — выходящий грузопоток ГПС.

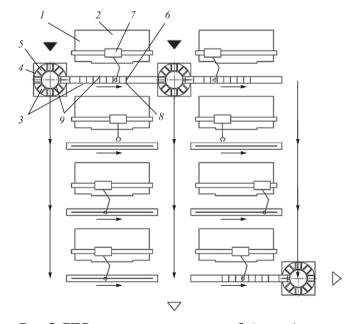


Рис. 7. ГПС с тремя передвижными обоймами (вариант линейной композиции односторонней и двухсторонней компоновок)







Значимость проведённых исследований проявляется в подтверждении положений теории строения УХ(Н), а также в их развитии и практическом приложении для построения ГПС с улучшенными потребительскими свойствами. Часть представленных в статье решений вошла в запатентованное авторами изобретение «Гибкая производственная система» [3].

#### Библиографические ссылки

1. **Мирошникова В.Д., Мирошникова Т.Д.** Критериальное поле развития гибких производственных систем // моногр. Н.А. Баянова, А.Л. Биб, А.С. Вернов и др. « Научные исследования: информация, анализ, прогноз» (НИ — 57) / Под общ. ред. проф.

- В.В. Шигурова. Кн. 57. Гл. II. Воронеж: ВГПУ; М.: Наука-информ, 2017. С. 19—34.
- 2. **Мирошникова В.Д.** Повышение эффективности функционирования устройств хранения (накопления) штучных грузов на основе исследования их внутренних свойств: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 2001. Владимир: Владим. гос. ун-т. 2004. 18 с.
- 3. **Мирошникова В.Д., Шугалов А.В., Мирошникова Т.Д.** Гибкая производственная система // Патент Российской Федерации № 2 510320. Заявл. 18.04.2012. Опубл. 27.03.2014. Бюл. № 9.

Ссылка для цитирования

Мирошникова В.Д., Шугалов А.В., Мирошникова Т.Д. Построение структурно-компоновычных решений гибких производственных систем на основе АТНС «Вертикаль» // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 6. С. 243—252.

УДК 658.5+62-5:004

**Ю.Г. Кабалдин,** д-р техн. наук, проф., **Д.А. Шатагин, А.М. Кузьмишина, П.В. Колчин** (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

uru.40@mail.ru

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБОРУДОВАНИЕМ ПРЕДПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Предложена единая базовая управляющая платформа, на основе которой необходимо как разрабатывать новое поколение систем управления технологическим оборудованием, так и совершенствовать существующие системы ЧПУ для цифровых производств. Такой платформой могут выступать открытые системы ЧПУ станков с большими вычислительными ресурсами и высоким быстродействием обработки большой базы данных, встроенными модулями нейропроцессоров и модулями связи с промышленным интернетом, т. е. с возможностями использования облачных технологий обработки больших объёмов данных как на серверах предприятий (локальные сети), так и на серверах провайдеров. Всё это создаст основу интеллектуального управления для широкой номенклатуры технологического оборудования, оснащённого системами ЧПУ.

**Ключевые слова:** цифровое производство; системы ЧПУ; открытая архитектура; встроенные модули нейропроцессоров; модуль связи; интеллектуальное управление оборудованием.

A unified basic control platform is proposed. It is necessary both to develop a new generation of control systems for technological equipment and to improve existing CNC systems for digital production on the basis of this control platform. Such a platform can be open systems of CNC machines with large computing resources and high processing speed of a large database, built-in modules of neuroprocessors and communication modules with industrial Internet, i.e. with the possibilities of using cloud technologies for processing large amounts of data both on enterprise servers (local networks) and on the providers servers. All this will create the basis of intellectual control for a wide range of technological facility equipped with CNC systems.

**Keywords:** digital production; CNC systems; open architecture; built-in modules of neuroprocessors; communication module; intelligent equipment control.

Правительством России принята концепция «Индустрия 4.0» в целях построения цифровой экономики нашей страны. Это обу-

словливает необходимость изменения подхода к организации промышленных предприятий и управлению их технологическим оборудо-







ванием. Однако оцифровывание производств в России пока не является общенациональной идеей и реализуется крайне медленно.

Одним из недостатков существующей организации предприятий и управления ими, сдерживающих реализацию цифровых технологий, является отсутствие единой концепции использования систем управления технологическим оборудованием вследствие их узкой ориентации на конкретный вид оборудования. При этом не учитывается значительный прогресс в области разработки программного и аппаратного обеспечения систем ЧПУ, позволяющий пользователю расширять возможности систем ЧПУ [1].

В настоящее время производители нового оборудования различного назначения вынуждены применять известные системы ЧПУ, которые не способны в полной мере решать задачи управления в конкретных условиях и не отвечают требованиям цифровых производств.

Необходимо расширять функциональные возможности систем ЧПУ, интегрировать в них новые модули и подсистемы. Появились также новые методы и гибридные технологии обработки деталей, аддитивные технологии и др., требующие применения модульных систем ЧПУ. Проблема существенно усложняется тем, что необходимо найти такое её решение, которое подходило бы как для вновь проектируемых, так и для уже успешно работающих систем управления технологическим оборудованием (металлорежущих станков, оборудования аддитивных технологий, промышленных роботов и т. д.).

Таким образом, в настоящее время отсутствует единая базовая управляющая платформа, на основе которой могло бы разрабатываться новое поколение систем управления технологическим оборудованием для цифровых производств. Такие платформы должны обладать большими вычислительными ресурсами и высоким быстродействием при обработке большой базы данных. Это позволит как существенно сократить расходы на разработку и эксплуатацию технологического оборудования, так и обеспечить его вхождение в единое информационное пространство предприятия. Отсутствие базовой платформы управления технологическим оборудованием сдерживает также разработку новых высокопроизводительных методов изготовления деталей (высокоскоростной обработки, аддитивных технологий, гибридных технологий обработки и т. д.) и в целом рост эффективности цифровых производств. Создание единой платформы управления оборудованием позволит решить и другую важную задачу — обеспечить технологическую безопасность нашей страны в целом, так как большинство имеющегося оборудования, в том числе и на предприятиях оборонного комплекса, оснащено импортными оборудованием и системами управления.

Формирование нового подхода к управлению оборудованием цифровых производств и разработка базовой унифицированной платформы, создание на её основе новых и усовершенствование существующих систем управления технологическим оборудованием — актуальная задача.

В качестве такой единой платформы могут выступать открытые системы ЧПУ станков [2] с встроенными модулями нейропроцессоров и модулями связи с промышленным интернетом, т. е. с возможностью использования облачных технологий обработки больших объёмов данных как на серверах предприятий (локальные сети), так на серверах провайдеров. Всё это создаст основу для интеллектуального управления широкой номенклатурой технологического оборудования, оснащённого системами ЧПУ с расширенными возможностями, использованием высокоскоростной обработки, аддитивных технологий и т. д., а также для интеграции в него подсистем диагностики, например, динамического состояния оборудования, износа инструмента и т. д.

В настоящее время в НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработана единая платформа расширения функциональных возможностей различных систем ЧПУ технологического оборудования на основе встраивания в них модулей высокопроизводительных вычислений и глубокого обучения искусственного интеллекта (ИИ) с использованием технологий nVidia CUDA [3-6], что обеспечивает возможность масштабирования на базе графических процессоров (GPU).

Искусственный интеллект трактуется сегодня как системы, которые могут понимать, прогнозировать и потенциально способны функционировать без участия человека, т. е. позволяют создавать «безлюдные» технологии. Монография [2] — одна из первых работ, посвящённых применению ИИ для управления технологическими системами. Современные системы (алгоритмы) ИИ уже могут реагировать на голосовые команды, а также самообучаться и выдавать готовые решения, обеспечивая информационную безопасность. Совершенство-







ванию этих систем могут помочь облачные технологии [7]. Считается, что слияние ИИ и облачных вычислений может стать источником инноваций и драйвером обеих технологий. В частности, облако может обеспечить ИИ информацией, а ИИ, в свою очередь, будет заполнять облако новыми данными.

База данных (БД) в облаке может размещаться как на серверах предприятия и использоваться в режиме реального времени, так и на серверах провайдеров и использоваться в режиме online.

При применении нейросетевых моделей прежде всего встаёт вопрос выбора конкретной архитектуры сети (числа слоёв и числа нейронов в каждом из них). Размер и структура сети должны соответствовать существу исследуемого явления. Поскольку на начальном этапе анализа явления его природа ещё неизвестна, то выбор архитектуры нейронной сети является непростой задачей и часто связан с длительным процессом интуитивного выбора при переборе различных вариантов.

Построенная нейронная сеть подвергается обучению (рис. 1). На этом этапе нейроны сети итеративно обрабатывают входные данные и корректируют свои веса таким образом, чтобы сеть могла формировать адекватные выходные сигналы. По сути, процесс обучения сети представляет собой подгонку модели, которая реализуется сетью, к имеющимся обучающим данным, характеризующим различные варианты условий протекания моделируемого технологического процесса. Ошибка для конкретной конфигурации сети определяется путём прогона через сеть всех имеющихся наблюдений входных параметров U процесса и сравнения значений выходных параметров  $\vec{W_m}$  модели с реальными значениями выходных параметров W технологического процесса. Все полученные разности суммируются, образуя так назы-

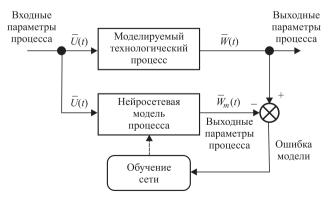


Рис. 1. Схема обучения нейросетевой модели технологического процесса

ваемую функцию ошибок, значение которой и есть ошибка сети. Обучение проводится до тех пор, пока ошибка сети не достигнет приемлемо малой величины.

Сеть, полученная в результате обучения, отражает закономерности, присутствующие в данных. При таком подходе она оказывается функциональным эквивалентом зависимостей между переменными, подобным тем, которые строятся при традиционном моделировании. Однако в отличие от традиционных моделей в случае нейронных сетей эти зависимости не могут быть записаны в явном виде. Иногда нейронные сети реализуют модели очень высокого качества, однако они представляют собой типичный пример нетеоретического подхода к исследованию. При таком подходе основные усилия сосредотачиваются исключительно на практическом результате — в данном случае на адекватности модели, а не на сути механизмов, лежащих в основе явления.

Следует отметить, что методы нейронных сетей могут применяться и в таких исследованиях, где целью является построение объясняющей модели явления, поскольку нейронные сети помогают изучать данные на предмет поиска значимых переменных или групп таких переменных, и полученные результаты могут облегчить процесс последующего построения модели.

Одно из главных преимуществ нейронных сетей состоит в том, что они, по крайней мере теоретически, могут аппроксимировать любую непрерывную функцию, и поэтому исследователю нет необходимости заранее принимать какие-либо гипотезы относительно модели, и даже в ряде случаев о том, какие переменные действительно важны. Однако существенным недостатком нейронных сетей является то обстоятельство, что окончательное решение зависит от начальных установок сети и, как уже отмечалось выше, его практически невозможно интерпретировать в традиционных аналитических терминах, которые обычно применяются при построении теории явления.

Такую сеть можно легко интерпретировать как модель вход-выход, в которой синаптические веса и пороговые смещения нейронов являются свободными параметрами. Эта сеть может моделировать функцию практически любой степени сложности, причём число слоёв и число элементов в каждом слое определяют сложность функции.

В работах [2—5] показано, что применение динамических моделей процессов механиче-

24.05.2018 11:01:44



ской обработки, построенных на основе нейронных сетей, в системах управления металлорежущими станками позволяет контролировать динамическую устойчивость процесса резания, добиваясь при этом также повышения точности и производительности обработки. Поэтому нейронные сети нами [2—5] использованы прежде всего при решении вопросов динамики резания, а также вопросов, связанных с аддитивными технологиями и высокоскоростной обработкой деталей на станках с ЧПУ, в частности для оптимизации траектории движения инструмента и выявления «безвибрационной обработки», т. е. установившегося режима движения.

Основной причиной потери устойчивости процесса резания при высокоскоростном фрезеровании является возникновение резонансных явлений на одной из собственных частот динамической системы резания. Механизм возникновения резонанса заключается в следующем. Обработанная поверхность при любом обороте фрезы имеет незначительную волнистость вследствие прерывистого характера резания. При каждом последующем обороте фрезы происходит резание «по следу», т. е. врезания лезвий фрезы в обрабатываемую поверхность накладываются на волнистость, оставшуюся от предыдущего оборота фрезы. Если колебания фрезы совпадают по фазе с волнистостью поверхности, то наступает резонанс — лавинообразное нарастание амплитуды колебаний. Динамическая система резания теряет устойчивость. При больших скоростях резания, свойственных высокоскоростному фрезерованию, процесс потери устойчивости приводит не только к ухудшению качества обработанной поверхности, но и к очень скорому выходу из строя шпинделя станка. Например, при неправильно заданной частоте вращения высокоскоростного шпинделя резонансные явления могут полностью привести его в негодность всего за три часа. При надёжном контроле за устойчивостью процесса резания высококачественный шпиндель, используемый для высокоскоростного фрезерования, может прослужить до нескольких лет. Отказ шпинделя — одна из самых серьёзных поломок высокоскоростных металлорежущих станков, требующая длительного и дорогостоящего ремонта. Для устранения неустойчивого процесса резания необходимо найти оптимальную область частот вращения шпинделя, при которых резонанс будет отсутствовать.

Таким образом, если при обычной обработке фрезерованием любого материала накла-

дываются два общеизвестных ограничения: ограничение, накладываемое инструментом, и ограничение, накладываемое станком, то при высокоскоростной обработке добавляется третье ограничение — ограничение, накладываемое динамической системой резания.

Ограничения по эксплуатационным свойствам станка и инструмента определяются и вносятся в паспорт станка или инструмента на заводе-изготовителе. Числовые значения ограничений, накладываемых динамической системой резания, можно оценить только непосредственно на производстве. Это объясняется тем, что частотные характеристики не присущи ни шпинделю, ни станку в отдельности, а служат характеристикой всей системы шпиндель + инструмент + заготовка. Стоит изменить любой из этих компонентов, как получается другая система, для которой должны быть найдены другие оптимальные параметры резания.

Обычно оптимальные частоты вращения высокоскоростного шпинделя ищут экспериментальным путём, методом пробных подходов, для каждой операции фрезерования. Но такой способ контроля устойчивости процесса резания не является эффективным.

По-видимому, более рациональной методикой является составление для каждого станка персонального динамического паспорта, исходя из которого можно будет назначать режимы резания, обеспечивающие максимальную производительность и гарантированную устойчивость упругой системы станка.

Следует заметить, что попытки составить различного рода персональные таблицы и базы данных наиболее благоприятных режимов резания для фрезерных станков предпринимаются уже давно, но именно в авиационной промышленности для высокоскоростного фрезерования алюминиевых и титановых сплавов метод персональной паспортизации станков является наиболее перспективным.

Сама специфика высокоскоростного фрезерования накладывает ограничения на форму и материал инструмента. Таким образом, остаётся не очень много вариантов состава системы шпиндель + инструмент + заготовка, для которых следует выявить динамические характеристики и занести их в паспорт.

Кроме того, саму процедуру паспортизации динамических свойств станков не обязательно осуществлять вручную — можно применять различные автоматизированные методы. Например, эффективная экспресс-методика







составления динамического паспорта станка может быть достаточно успешно реализована на базе алгоритмов нелинейной динамики [2—5] с построением модели динамической системы резания по временной реализации выходных параметров этой системы.

В качестве выходных параметров системы могут выступать сигналы, зафиксированные разнообразными датчиками, укреплёнными вблизи от зоны резания, и отражающие динамику процесса обработки.

Далее по имеющейся временной реализации одной наблюдаемой динамической переменной, например по сигналу виброакустической эмиссии, полученному в процессе резания, можно сконструировать аттрактор, основные свойства которого будут такими же, как у всей динамической системы резания в

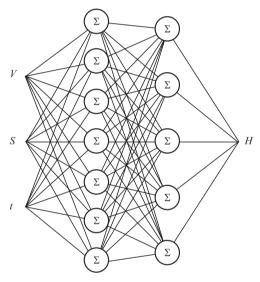


Рис. 2. Пример использования нейронной сети для форматирования динамического паспорта станка. Входные параметры сети: V— скорость резания; S— подача; t— глубина резания. Выход сети: H— информационная энтропия аттрактора (используется в качестве критерия устойчивости динамической системы резания)

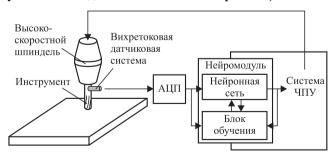


Рис. 3. Схема замкнутого контура управления высокоскоростным шпинделем при использовании нейронной сети для первоначального формирования динамического паспорта станка и последующей оптимизации на его основе режимов резания

целом. Последующий анализ реконструированного аттрактора позволяет определить тип динамики процесса резания (хаотичный или регулярный) при текущих режимах, степень устойчивости динамической системы станка и величину возмущающих воздействий, способных вывести систему из устойчивого состояния с переходом к хаосу или разрушающему резонансу.

Аттрактор системы резания можно построить по сигналам датчиков, регистрирующим радиальные колебания вала высокоскоростного шпинделя, независимо от физической природы самих датчиков, будь то пьезоэлектрические виброакселерометры, лазерные виброметры или наиболее перспективные, на наш взгляд, для использования в реальных производственных условиях вихретоковые датчиковые системы.

Результаты исследования реконструированных по сигналам датчиков аттракторов [2—5], характеризующих степень устойчивости динамической системы резания для различных режимов обработки, составят информационную основу динамического паспорта станка.

Для того чтобы исключить практику пробных проходов, следует формировать динамический паспорт на основе многослойной нейронной сети (рис. 2), которая будет обучаться, анализируя динамику резания в процессе обычной штатной работы станка, аппроксимируя её и определяя с помощью интерполяции недостающую информацию для тех режимов обработки, для которых исследования устойчивости динамической системы станка ещё не проводились.

Другими словами, составление динамического паспорта станка [6] будет происходить автоматизированно, без вмешательства человека, путём обучения нейронной сети или, если взглянуть шире, путём самообучения замкнутой системы динамическая система резания + датчики + нейронная сеть + система управления станком (рис. 3). Визуализацию динамического паспорта станка и сравнительный анализ таких паспортов для различных станков можно проводить при помощи карт устойчивости — двумерных выборок, отражающих степень устойчивости динамической системы станка для различных вариантов режимов резания. Примеры таких карт приведены на рис. 4.

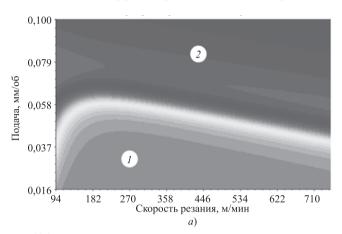
Обученная нейронная сеть в соответствии с содержащимся в ней динамическим паспортом станка сможет сама назначать частоту вращения высокоскоростного шпинделя, оп-







тимальную для данных условий обработки, возьмёт на себя функцию, более свойственную САМ-системам, чем системам управления станками. Причём в этом случае для динамической корректировки условий процесса



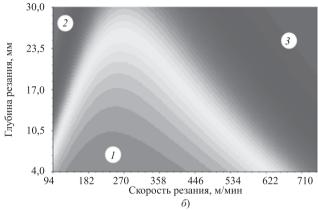


Рис. 4. Карты устойчивости динамической системы высокоскоростного фрезерования в координатах скорость резания — подача (а) и скорость резания — глубина резания (б): 1 — область, соответствующая устойчивому состоянию системы резания; 2, 3 — области, соответствующие зонам сильной вибрации высокоскоростного шпинделя

резания нет необходимости усложнять систему управления станком различными элементами СА М-систем — достаточно дополнить систему ЧПУ нейропроцессором или нейронным модулем [2].

Для управления и диагностики устойчивости процесса резания была также разработана интеллектуальная система анализа и прогнозирования динамического состояния технологических систем при удалённом доступе. Система состоит из БД динамического состояния станка, системы управления БД (СУБД), нейронной сети анализа и прогнозирования динамического состояния технологической системы, нейронной сети диагностики и классификации неисправностей, программного обеспечения для анализа сигнала виброакустической эмиссии (ВАЭ). БД динамического состояния станка содержит сведения о векторе технологических параметров и соответствующем векторе динамического состояния, полученном в ходе экспериментальных исследований. Структура БД динамического состояния станка представлена на рис. 5.

БД динамического состояния располагается на удалённом вычислительном сервере предприятия и получает информацию о векторе технологических параметров, векторе неисправностей, параметрах измерительной аппаратуры и соответствующем векторе динамического состояния с помощью протокола передачи данных ТСР/ІР. Для этого стойка ЧПУ станка подключается к беспроводной сети Wi-Fi и имеет свой IP-адрес. Сигнал ВАЭ, полученный с датчиков вибрации, оцифровывается и передаётся на вычислительный сервер. Сигнал фильтруется, записывается на

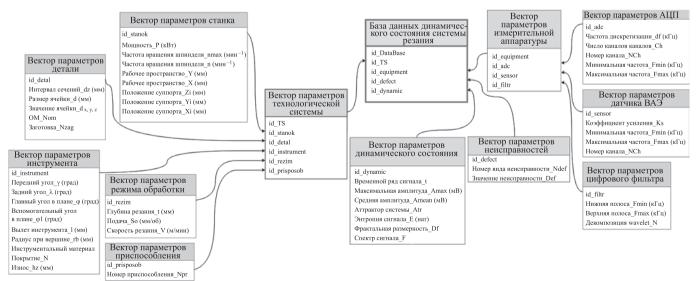


Рис. 5. Структура БД динамического состояния системы резания







жёсткий диск и подвергается дальнейшей обработке: определяются спектр сигнала, значения средней и максимальной амплитуд, рассчитывается энтропия сигнала, реконструируется аттрактор системы резания на основе теоремы Такенса, определяются его фрактальная размерность и старший показатель Ляпунова [2—5]. В качестве фильтров используются полосовые фильтры для удаления частот вынужденных колебаний и w avelet-фильтр для подавления шумовой составляющей. Полученные из сигнала ВАЭ данные передаются в БД динамического состояния, где им соответствуют конкретные значения вектора технологических параметров системы. Таким

образом, в течение работы технологической системы (TC) происходит постоянное пополнение БД динамического состояния (рис. 6). Это позволяет оперативно отслеживать любые изменения в TC и увеличивать её адаптивные возможности.

После накопления определённого количества информации о динамическом состоянии станка происходит обучение нейронной сети регрессионного анализа, которая связывает значения вектора технологических параметров с соответствующим вектором динамического состояния станка (рис. 7).

Входной слой нейронов состоит из 10 нейронов, на вход которых подаётся информа-

ция о векторе станка (S1), векторе детали (S2), векторе инструмента (S3), векторе приспособления (S4) и векторе режимов обработки (S5) из БД динамического состояния. Выходной слой нейронов состоит из 5 нейронов, которые характеризуют вектор динамического состояния Sd, содержащий сведения об амплитуде автоколебаний, доминирующей частоте, фрактальной размерности аттрактора, энтропии сигнала, старшем показателе Ляпунова. Обучение нейронной сети (см. рис. 7) происходит методом обратного распространения ошибки с использованием метода градиентного спуска для минимизации ошибки и оптимизации числа нейронов в скрытом (промежуточном) слое.

Для обучения нейронной сети используются обучающая выборка и проверочная выборка из БД динамического состояния. При достижении значения ошибки 5 % нейронная сеть прекращает обучение.

В связи с большим объёмом поступающих данных и необходимостью постоянного переучивания нейронной сети были применены подходы параллельных вычислений с использованием графических процессоров GPU и технологии nVIdia CUDA, в частности специализированная библиотека с uDNN. Данная библиотека содержит оптимизированные для GPU реализации свёрточных и рекуррентных сетей, различных функций акти-

24.05.2018 11:01:44

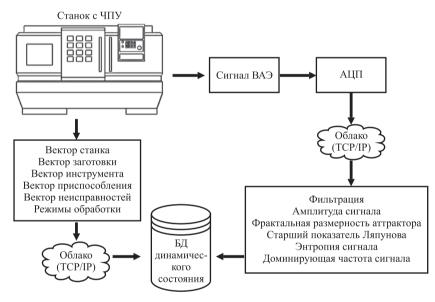


Рис. 6. Процесс заполнения БД динамического состояния станка

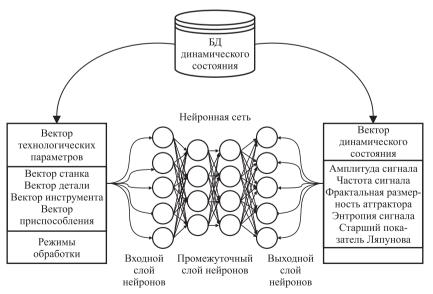


Рис. 7. Процесс обучения нейронной сети для анализа и прогнозирования динамического состояния станка



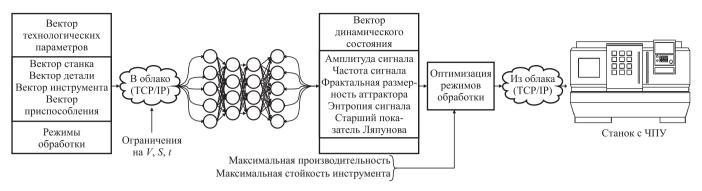


Рис. 8. Процесс определения оптимальных режимов обработки для заданного вектора технологических параметров

вации (полулинейной, сигмоидальной, гиперболического тангенса) и оптимизированный алгоритм обратного распространения ошибки. Такой подход позволил повысить производительность обработки в 5...7 раз.

По окончании обучения нейронная сеть способна моделировать динамическое состояние технологической системы в целях оптимизации режимов обработки и вектора технологических параметров (рис. 8). Для этого нейронная сеть путём перебора векторов технологических параметров и наложенных ограничений моделирует различные динамические состояния технологической системы, которые поступают на блок оптимизации, где рассчитываются минимумы или максимумы целевых функций.

После определения оптимальных значений вектора технологических параметров данные поступают по протоколу связи ТСР/IР на стойку ЧПУ и учитываются при механической обработке. Таким образом, интеллектуальная система анализа и прогнозирования динамического состояния технологического оборудования способна определять оптимальные режимы обработки, геометрию инструмента, способ закрепления детали в соответствии с особенностями конкретного оборудования и формы детали.

#### Библиографические ссылки

- 1. **Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М.** Принципы построения систем с ЧПУ с открытой архитектурой // Приборы и системы управления. 1996. № 8. С. 18—21.
- 2. **Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В.** Управление динамическими процессами в техно-

логических системах механообработки на основе искусственного интеллекта. Комсомольск-на-Амуре, КнАГТУ, 2003. 201 с.

- 3. **Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А., Серый С.В.** Диагностика выходных параметров процесса резания в режиме реального времени на основе фрактального анализа и вейвлет-анализа с использованием программно-аппаратных средств N ational Instruments и Nvidia CUDA // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 80—82.
- 4. **Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А.** и др. Интеллектуальные системы диагностики состояния оборудования и износа инструмента // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. № 2. С. 47—50.
- 5. **Кабалдин Ю.Г., Лаптев И.Л., Шатагин Д.А.** и др. Оценка состояния режущего инструмента в режиме реального времени на основе подходов нелинейной динамики с использованием NVIDIA CUDA в программной среде LABVIEW / / Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 5 (102). С. 114—121.
- 6. **Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Лаптев И.Л., Сидоренков Д.А.** Разработка динамического паспорта станка на основе нейросетевого моделирования его рабочего пространства с использованием технологии NVIDIA CU DA и подходов глубокого обучения // Известия вузов. Машиностроение. 2 016. № 10 (679). С. 49—56.
- 7. **Промышленный** интернет на практике: удалённая диагностика станков с ЧПУ с помощью технологии Winnum/http:controlengrussia.com/ ( дата обращения: 14.02.2018 г.)

#### Ссылка для цитирования

**Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Кузьмишина А.М., Колчин П.В.** Управление технологическим оборудованием предприятия в условиях цифровых производств на основе искусственного интеллекта и облачных технологий // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 6. С. 252—259.

#### Уважаемые читатели!

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







УДК 681.3:621.9

#### В.В. Ерохин, д-р техн. наук

(Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского)

erohinvv@mail.ru

### ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НА БАЗЕ СТАНКА С ЧПУ

Рассмотрены способы решения технологической задачи на базе станка с ЧПУ. Представлена обобщённая структурная схема адаптивного управления технологическим процессом на базе станка с ЧПУ. Описаны способы нахождения производной по времени: синхронное детектирование и запоминание экстремума. Сформулированы случайные и детерминированные стратегии поиска экстремума. Проанализированы детерминированные методы поиска экстремума: Гаусса—Зайделя, градиента, наискорейшего спуска (подъёма), сканирования.

**Ключевые слова:** числовое программное управление; автоматизация; оптимизация; управление технологическим процессом; технологическое оборудование.

The ways of solving the technological problem on the CNC machine tool basis are considered. The generalized structural scheme of the technological process adaptive control on the CNC machine basis is presented. Methods for finding the time derivative — synchronous detection and storage of an extremum — are described. The random and deterministic strategies of extremum search are formulated. Deterministic methods of extremum search — Gauss—Seidel, gradient, the most fast descent (lifting), scanning — are analyzed.

**Keywords:** n umerical p rogram c ontrol; auto mation; opt imization; t echnological p rocess c ontrol; technological equipment.

Введение. Для оптимального управления обработкой материалов необходимо определить такие значения искомых технологических параметров, которые обеспечили бы наибольшую эффективность процесса резания при соблюдении ограничений по качеству обработки, производительности, расходу оборотных средств, техническим, технологическим и организационно-техническим возможностям станка.

Решение технологической задачи. Один из способов решения технологической задачи на базе станка с ЧПУ представлен на рис. 1 [1, 2]. В состав управляющей программы (см. рис. 1) должны входить кадры с описанием измерительных циклов. Измерительные циклы формируют массивы коррекции разнообразного назначения (статическая настройка).

В процессе резания измеряют параметры динамической настройки с помощью датчиков силовых параметров резания (силы резания, вращающего момента шпинделя), датчиков температуры, вибраций, виброакустического спектра, датчиков деформаций и смещений и др. Обобщённая структурная схема адаптивного управления технологическим процессом на базе станка с ЧПУ представлена на рис. 2 [1—3].

Математическая модель (см. рис. 2) строится на основе планирования экспериментов. Блок оптимизации вносит необходимые коррективы

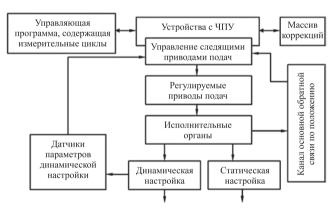


Рис. 1. Решение технологической задачи

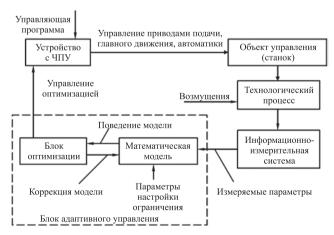


Рис. 2. Обобщённая структурная схема адаптивного управления технологическим процессом на базе станка с ЧПУ







в математическую модель. К параметрам настройки относят коэффициенты уравнений, определяющих математическую модель. Она связывает критерий оптимальности с искомыми технологическими и измеряемыми параметрами. Блок оптимизации, строящийся по методу линейного программирования, определяет такие значения искомых технологических параметров, которые обеспечивают критерию оптимальности максимум или минимум.

С помощью метода (стратегии) оптимизации управления технологическими процессами с несколькими аргументами функции качества этого процесса и каналами управлениями решают две задачи:

- 1. Получение рабочей информации, т. е. определение отклонений от точки экстремума, частных производных и градиента функции качества управляемого процесса.
- 2. Использование рабочей информации, т. е. осуществление необходимых управляющих воздействий для движения процесса к экстремальной точке.

В стратегию оптимизации входит создание как поисковых (пробных) воздействий для решения первой задачи, так и рабочих (регулирующих) воздействий для выполнения второй. Эти воздействия могут осуществляться раздельно (последовательно во времени) и совмещённо.

Управляющие системы с раздельными поисковыми и рабочими воздействиями вносят меньше искажений в управляемый технологический процесс, поскольку шаг поисковых воздействий обычно значительно меньше шага рабочих воздействий, но быстродействие системы управления раздельных воздействий меньше, чем совмещённых.

Шаг поисковых воздействий обычно постоянен. По характеру использования полученной информации различают системы управления с постоянным и переменным приращением регулирующих воздействий. В обоих случаях направления приращений определяются знаками частных производных или градиента функции качества.

При переменном шаге рабочих воздействий чаще всего его делают пропорциональным значению частной производной или аргумента, так как в обычных случаях чем дальше расположена точка от экстремального значения функции качества, тем больше абсолютные значения её производных и градиента. По мере приближения к экстремуму абсолютные значения производных и градиента

уменьшаются и достигают нуля с изменением знака при переходе через экстремальное значение функции качества. Поэтому чем больше абсолютное значение частных производных и градиента функции качества, тем большее приращение можно давать регулирующему воздействию без риска перехода через экстремум функции качества.

Основными классификационными признаками систем оптимизации являются случайность или детерминированность (направленность) стратегии поиска. В случайных стратегиях направления поисковых воздействий задаются случайными, все направления считаются равновероятными, и на основе анализа этих случайных проб или других случайных процессов (флуктуаций и шумов) выбирается направление движения к экстремуму функции качества. В детерминированных стратегиях поиск осуществляется по определённым алгоритмам, заранее разработанным для движения к экстремуму функции качества.

Используются три основные способа получения рабочей информации о значении градиента функции качества (т. е. о направлении и характере изменения этой функции) или об отклонении рабочей точки функции от экстремального значения.

Способы нахождения производной по времени. Этот процесс основан на определении и суммировании частных производных функции качества по регулирующим воздействиям:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial x_1} \frac{dx_1}{dt} + \frac{\partial F}{\partial x_2} \frac{dx_2}{dt} + \dots + \frac{\partial F}{\partial x_n} \frac{dx_n}{dt}.$$

При этом создают определённые постоянные значения скоростей  $\frac{dx_1}{dt},...,\frac{dx_n}{dt}$  [4] с их последовательным протеканием во времени (рис. 3). В каждом интервале времени  $\tau$  все производные регулирующих воздействий по времени, кроме одной, равны нулю, поэтому для этого интервала в дифференцирующем устройстве формируется  $\frac{dF}{dt} = \frac{\partial F}{\partial x_i}$ . При n аргументах за время  $n\tau$  осуществляется выдача n импульсов по n каналам и определяются все компоненты градиента функции качества.

Недостатками аппаратной реализации являются [2, 3]:

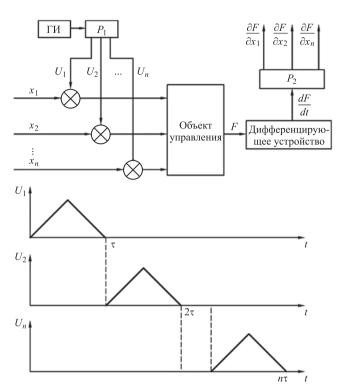
сравнительно высокий уровень помех, сопровождающих операцию дифференцирования;

относительно большая длительность цикла опроса всех аргументов.





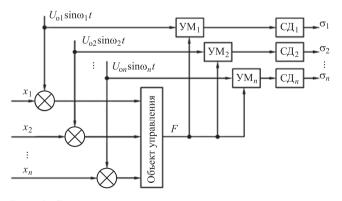




**Рис. 3. Определение производной по времени:**  $\Gamma \mathbf{И}$  — генератор импульсов; P — распределитель

Синхронное детектирование. Этот способ основан на том, что к медленно меняющимся регулирующим воздействиям  $x_i$  принудительно добавляются специально создаваемые поисково-периодические (обычно гармонические) высокочастотные воздействия с небольшими амплитудами  $U_{oi}$ sin $\omega_i t$  (рис. 4).

Поисковые частоты  $\omega_i$  выбирают по числу аргументов, причём ни одна из этих частот не равна сумме или разности любой пары других частот. Обычно (по закону нечётных чисел)  $\omega_i = (2m+1)\omega_o$ . Для усреднения переменных величин интервал времени измерения выбирается достаточно большим ( квазистатический режим).



**Рис. 4. Синхронное детектирование:** УМ — перемножающее устройство; СД — синхронный детектор

Моделированная функция качества поступает одновременно в n синхронных детекторов. На выходе каждого детектора [5] получается усреднённое произведение модулированной функции качества и опорного колебания  $U_{oi}\sin\omega_i t$ :

$$\sigma_k = \overline{FU_{ok} \sin \omega_k t} \approx 0,5U_{ok}^2 \frac{\partial F}{\partial x_k}.$$

Следовательно, имея все компоненты, можно определить градиент функции качества.

Запоминание экстремума. Способ основан на том, что посредством поисковых движений изображающая точка перемещается в окрестности экстремума. При достижении функциями качества экстремального значения  $F_{\mathfrak{I}}$  оно запоминается и используется для нахождения градиента функции качества.

Если текущее значение функции качества *F*, тогда

$$F - F_9 \approx 0.5 \sum_{i=1}^{n} \Delta x_i \frac{\partial F}{\partial x_i}$$

Задавая отклонения  $\Delta x_i$  и измеряя разность  $F-F_{\ni}$ , можно определить компоненты градиента функции качества. Выделить  $\frac{\partial F}{\partial x_i}$  из суммы можно с помощью синхронных детекторов.

Стратегии поиска экстремума. Они бывают случайными (случайный поиск и поиск с использованием статистического градиента) и детерминированными (методы Гаусса—Зайделя, градиента, наискорейшего спуска (подъёма), сканирования).

Случайный поиск может быть реализован в трёх модификациях: случайный поиск с возвратом, случайный поиск с пересчётом и до изменения знака.

Случайный поиск с возвратом (рис. 5) заключается в следующем: из начального состо-

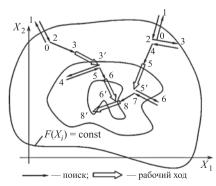


Рис. 5. Случайный поиск



яния 0 совершается первое пробное движение 0—1 в случайном направлении. Полученное при этом изменение функции качества (определяется сравнением последующего значения с предыдущим) позволяет совершить шаг либо в верном, либо в нежелательном направлении. Если первое пробное перемещение приводит к успеху, то в том же направлении осуществляется первый рабочий шаг. Затем в случайном направлении производится второе поисковое воздействие и т. д. Если же первое поисковое движение не приводит к улучшению функции качества, то рабочий шаг не осуществляется. Система возвращается в исходную точку и снова начинается случайный поиск.

Случайный поиск с пересчётом отличается от предыдущего тем, что при поисковом шаге 0-1, ухудшающем функцию качества, система не возвращается в исходное состояние. Из положения 1 осуществляется второй случайный поиск 1-2 и т. д. вне зависимости от верности шага.

Случайный поиск до изменения знака отличается от поиска с возвратом тем, что определив в случайных перемещениях верное направление, улучшающее функции качества, система продолжает рабочее движение в том же направлении до момента изменения знака приращения функции качества.

Поиск с использованием статистического градиента осуществляется следующим образом (рис. 6). Из начальной точки 0 выполняются подряд m случайных одинаковых движений  $\Delta_i$  в разных направлениях с одновременным вычислением приращения функции качества и образованием статистического градиента

$$\overline{G} = \sum_{i=1}^{m} \overline{\Delta}_{i} [F(X_{i+1}) - F(X_{i})].$$

Рабочий шаг осуществляется по направлению вектора  $\overline{G}$ . При этом возможны две моди-

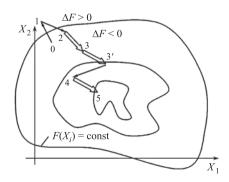


Рис. 6. Случайный поиск с использованием статистического градиента

фикации рассмотренной стратегии. Первая — после каждого рабочего шага повторяется поиск нового направления, и следующий рабочий шаг осуществляется по вновь вычисленному направлению и т. д. Вторая — в вычислительном цикле выбор направления рабочих шагов производится подряд до тех пор, пока вектор  $\overline{G}$  не изменит знак приращения функции качества. Затем повторяется процедура поиска нового направления и реализуются несколько рабочих ходов в новом направлении до изменения знака приращения функции F.

Метод Гаусса—Зайделя по поиску экстремума (рис. 7) заключается в поочередном изменении регулирующих воздействий при сохранении постоянства остальных. При этом выбирается направление изменения каждой координаты  $X_i$  в сторону уменьшения абсолютного значения  $\frac{\partial F}{\partial x_i}$ , а движение осуществляется до положения, в котором  $\frac{\partial F}{\partial x_i} = 0$ . Затем так же поступают со следующей координатой и т. д., в том числе и с последней координатой и т. д., в том числе и с последней координатой х<sub>n</sub>. После этого осуществляется второй такой же цикл по всем координатам, третий цикл и т. д. до тех пор, пока не выйдут в экстремум F.

Метод градиента (рис. 8) основан на определении мгновенных значений градиента функции качества путём измерения всех его частных производных и организации движе-

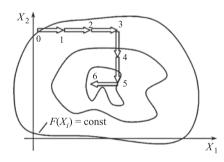


Рис. 7. Детерминированный поиск по методу Гаусса— Зайделя

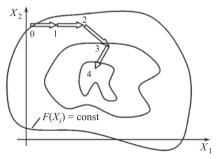


Рис. 8. Детерминированный поиск по методу градиента







ния системы (непрерывного и дискретного) по направлению, близкому к направлению градиента  $\sum_i \frac{\partial F}{\partial x_i}$ , стремящегося к нулю. В идеальном случае в каждой точке пересечения траектории движения с поверхностью равных значений функции качества касательные взаимно перпендикулярны. Путь движения рабочих ходов намного короче, чем при движении по методу Гаусса—Зайделя, так как движение выполняется по гипотенузе — перемещение 2—3 (см. рис. 8) заменяет перемещения 2—3 и 3—4, перемещение 3—4 заменяет перемещения 4—5 и 5—6.

Метод наискорейшего спуска (подъёма) близок к методу градиента и отличается тем, что движение направляется не по мгновенному значению градиента функции качества, а по его значению в начале движения и до момента обращения в ноль частной производной  $\frac{\partial F}{\partial l}$  по направлению движения (рис. 9). В этой точке вновь определяется значение градиента,

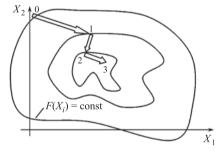


Рис. 9. Детерминированный поиск по методу наискорейшего спуска

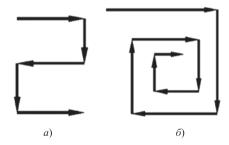


Рис. 10. Детерминированный поиск по методу сканирования:

a — по строчной развёртке;  $\delta$  — по спиральной развёртке

и движение осуществляется по новому направлению. В отличие от метода градиента изображающая точка, формирующая траекторию рабочих шагов, движется не по кривой, а по взаимно перпендикулярным отрезкам прямых, так как частная производная  $\frac{\partial F}{\partial l} = 0$  в точке касания траектории движения к поверхности F = const. Градиент функции качества F всегда нормален к поверхности F = const.

Метод сканирования (полный перебор) используют для определения экстремума функции качества, если известно, что экстремум существует, а свойства функции качества неизвестны (рис. 10).

Регулярность метода сканирования определяется порядком перебора значений. Обычно перебор осуществляют по строчной развёртке (рис. 10, a) или спиральной развёртке (рис. 10,  $\delta$ ).

**Вывод.** Применение описанных методов оптимального управления технологическим процессом на базе станков с ЧПУ позволяет уменьшить время на динамическую настройку станка с ЧПУ до 40 % и статическую настройку станка с ЧПУ до 75 % или вообще её сократить.

#### Библиографические ссылки

- 1. **Ерохин В.В., Памфилов Е.А.** Автоматизированные системы проектирования и управления технологическим процессом. Брянск: БГИТА, 2011. 368 с.
- 2. **Ерохин В.В., Топорков М.П., Моргаленко Т.А.** Системы управления производственным процессом. Брянск: БГТУ, 2009. 158 с.
- 3. Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М. Системы числового программного управления. М.: Логос, 2005. 296 с.
- 4. **Ерохин В.В.** Выбор методов реализации геометрической задачи управления устройствами ЧПУ в технологическом оборудовании // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 1. С. 18—25.
- 5. **Белов М.П., Зементов О.И., Козярук А.Е.** Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации. М.: Академия, 2006. 368 с.

Ссылка для цитирования

**Ерохин В.В.** Оптимальное управление технологическим процессом на базе станка с ЧПУ // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 6. С. 260—264.

#### 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 628.971:621.385.2

С.А. Амелькина, канд. техн. наук, доц., Э.А. Амелькин, К.А. Дупленкова (Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск), С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф. (Московский технологический университет)

mikaeva@npo.lit.ru

## ПРОЕКТ ОСВЕЩЕНИЯ КВАРТАЛА г. САРАНСК СВЕТОДИОДНЫМИ СВЕТИЛЬНИКАМИ

Статья посвящена разработке энергоэффективного проекта освещения городского квартала с учётом новых стандартов наружного утилитарного освещения. Проект разработан на основе компьютерного моделирования с использованием современных светодиодных светильников различной мощности.

**Ключевые слова:** установка наружного освещения; утилитарное освещение; яркость дорожного покрытия; освещённость; светодиодные светильники; пороговое приращение яркости.

The article is devoted to the development of an energy-efficient lighting project for the urban quarter, taking into account the new standards of outdoor utilitarian lighting. The project is developed on the basis of computer modeling through the use of modern LED lamps of various capacities.

**Keywords:** installation of outdoor lighting; utilitarian lighting; brightness of the road surface; illumination; LED lights; threshold brightness increment.

В современном мире на освещение тратится большое количество электроэнергии (до 20 % от всей вырабатывающейся энергии), поэтому использование эффективных источников света для утилитарного освещения является актуальным. Для освещения улиц и дорог основными источниками света пока ещё являются лампы типов ДНаТ, ДНаЗ (типа REFLAX), ДРЛ из-за их дешевизны и достаточно высокой световой отдачи, но при этом качество освещения оставляет желать лучшего. Светодиодное освещение является достойной альтернативой традиционной технологии, даже с учётом пока ещё высокой стоимости. В нашей стране и во всем мире есть множество компаний, выпускающих светодиодные светильники, и конкуренция на рынке с каждым годом возрастает.

В настоящее время светодиодный светильник в пересчёте на световую мощность дороже светильников с традиционными источниками света. Среди преимуществ светодиодных светильников можно отметить их высокую эффективность, абсолютную безопасность, высокий срок службы, возможность создания светильников с широким диапазоном световых потоков. Светодиодное освещение городских улиц — реальность современного мира и энергосберегающих технологий.

Сегодня в мире насчитывается немало пилотных уличных осветительных установок со светодиодами, например в Гааге, Дубайе, Торонто, Нью-Йорке, нескольких немецких городах, а также в России.

В сентябре 2009 г. по инициативе ГУП «Ленсвет» был реализован первый пилотный проект по использованию светодиодного освещения на центральных улицах Санкт-Петербурга. Этот проект призван доказать целесообразность использования светодиодных технологий на улицах городов. Удачный опыт реализации проектов уличного освещения на основе светодиодных источников света будет способствовать расширению его внедрения во всей стране.

В 2011 г. вступили в силу СНиП 23-05-95\* «Свод правил. Естественное и искусственное освещение» (СП 52.13330.2011) в актуализированной редакции. В 2014 г. было введено в действие сразу несколько стандартов, регламентирующих утилитарное освещение: ГОСТ Р 55706—2013, ГОСТ Р 55707—2013 и ГОСТ Р 55708—2013. В результате в принципах и нормах освещения улиц и селитебных зон произошёл ряд изменений, которые были учтены при создании предлагаемого проекта освещения городского квартала.

Объектом светотехнического аудита стал квартал г. Саранск, ограниченный улицами







Таблица 1 Средняя яркость  $L_{\rm cp}$  и неравномерность яркости  $U_0$  дорожного покрытия

	$L_{ m cp}$ , і	кд/м <sup>2</sup>	$U_0$		
Название улицы	Норма	Изме- рение	Норма	Изме- рение	
Полежаева	1	2,65	0,4	0,45	
Богдана Хмельницкого	0,6	0,84	0,4	0,54	
Пролетарская	0,6	1,99	0,4	0,67	
Большевистская	0,6	2,32	0,4	0,67	

Таблица 2

# Средняя горизонтальная освещённость $E_{\rm cp}$ и равномерность распределения освещённости внутри квартала

	$E_{\mathrm{cp}}$	, лк	$U_0$		
Название объекта	Норма	Изме- рение	Норма	Изме- рение	
Автостоянка около главного корпуса университета	6	0,4	1	-	
Автостоянка около 16-го корпуса университета	6	4,7		_	
Площадка около студенческой столовой	4	1,2	0,2	0,08	
Проезд во внутренний двор университета	4	3,7	0,2	0,05	

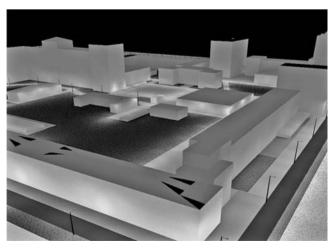


Рис. 1. 3D-визуализация студенческого квартала

Полежаева, Пролетарская, Богдана Хмельницкого и Большевистская, который располагается в центре города, где вопрос освещения имеет особое значение [1].

Улица Полежаева является магистральной улицей районного значения в центре города регулируемого движения, класс улицы по освещению — Б2. Улицы Пролетарская, Богдана Хмельницкого и Большевистская являются улицами класса В2. Согласно ГОСТ Р 55707—2013 на каждой улице были выбраны площадки, которые были разбиты на элементарные контрольные участки. Измерения освещённости проводили без предварительной подготовки осветительной установки люксметром ТКА — ЛЮКС. Затем в соответствии с ГОСТ Р 55708—2013 провели пересчёт освещённости в яркость. Расчёты проводили в программе Microsoft O ffice Excel. В табл. 1 приведены значения средней яркости дорожного покрытия, измеренные косвенным методом.

Результаты измерений показывают, что уровень яркости дорожного покрытия завышен. Внутри квартала находится университетский городок, в котором расположены основные корпуса и административные здания Национального исследовательского Мордовского государственный университета им. Н.П. Огарёва. На территории университетского городка расположены автомобильные стоянки, проезды к зданиям, площадки перед входами в корпуса университета, бассейн, пешеходные зоны и тротуары. Поэтому объектом светотехнического аудита стали не только улицы, ограничивающие квартал, но и все эти объекты внутри квартала. Установлено, что освещённость внутренней территории университета и в одной из зон, где были проведены измерения, не соответствует нормам (табл. 2).

На основе данных, полученных при светотехническом мониторинге, с помощью компьютерной программы D IALux нами были разработаны проекты с применением современных энергосберегающих технологий, которые являются экономически и энергетически выгодными и удовлетворяют нормам наружного утилитарного освещения. Светодиодные светильники обладают множеством преимуществ. На основе таких светильников была спроектирована осветительная установка студенческого квартала Саранска (рис. 1, 2).

В проекте были использованы светодиодные светильники ДКУ01 GALAD мощностью от 80 до 160 Вт (рис. 3). Светодиодные светильники серии ДКУ01 мощностью 80...160 Вт пред-





Таблица 3 **Результаты компьютерного моделирования параметров освещения дорог квартала** 

Улица	*	едняя яркость пого покрытия $L_{\rm cp},$ кд/м $^2$		Общая равномерность распределения яркости дорожного покрытия $U_0$		Продольная равномерность распределения яркости дорожного покрытия $U_l$		Пороговое приращение яркости <i>TI</i> , %	
	Норма	Изме- рение	Норма	Изме- рение	Норма	Изме- рение	Норма	Изме- рение	
Полежаева	Не менее 1,0	1,08	Не менее 0,4	0,62	Не менее 0,6	0,6	Не более 15	8	
Большевистская	Не менее 0,6	0,75	Не менее 0,4	0,62	Не менее 0,5	0,51	Не более 15	7	
Богдана Хмельницкого	Не менее 0,6	0,71	Не менее 0,4	0,55	Не менее 0,5	0,5	Не более 15	8	
Пролетарская	Не менее 0,6	0,75	Не менее 0,4	0,5	Не менее 0,5	0,5	Не более 15	9	

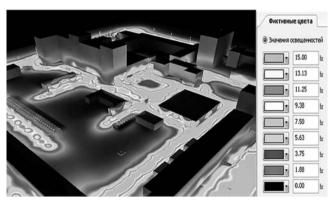


Рис. 2. Распределение освещённости в фиктивных цветах по поверхностям внутри квартала



Рис. 3. Внешний вид светильника ДКУ01 GALAD

назначены для замены уличных светильников серий ЖКУ (лампа ДНаТ 150...250 Вт) и РКУ (лампа ДРЛ 250...400 Вт). Технические характеристики светодиодного светильника ДКУ01: индекс цветопередачи Ra=75...80, цветовая температура 4750...7000 К. Регулировка угла поворота  $\pm 15^\circ$  относительно горизонтальной оси, экран-рассеиватель из ПММА, степень защиты IP65, срок службы светильника от  $50\,000$  ч (свыше  $12\,$  лет).

Кроме улиц, ограничивающих квартал г. Саранск, в проект вошла и внутренняя территория университета, для освещения которой были использованы светодиодные светоди

тильники ДКУ01-80-001 (см. рис. 3) и венчающие светильники ЖТУ06-70-005 Шар [2, 3].

Результаты компьютерного моделирования параметров освещения дорог квартала и их нормируемые значения в соответствии с ГОСТ Р 55706—2013 представлены в табл. 3.

Проект квартала Саранска, созданный в программе DIALux, наглядно показал светораспределение по поверхностям улиц, тротуаров, пешеходных зон. Можно оценить полученные значения яркости (для дорог со стандартной геометрией) и освещённости (пешеходные зоны, перекрёстки дорог, парковки), сопоставив их с требованиями нормативных документов. При использовании в качестве световых приборов светодиодных светильников получены значения яркости и освещённости, которые удовлетворяют установленным нормам для утилитарного освещения.

#### Библиографические ссылки

- 1. Амелькина С.А., Амелькин Э.А. Оценка эффективности использования уличных светодиодных светильников в установках наружного освещения г. Саранска / / Полупроводниковая светотехника. 2010. № 8. С. 40—42.
- 2. Железникова О.Е., Синицина Л.В., Амелькина С.А., Микаева С.А. Исследования и практические рекомендации по применению систем освещения со светодиодными источниками света //Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 3. С. 45—48.
- Современные технологии. 2016. № 3. С. 45—48. 3. **Амелькина С.А., Железникова О.Е., Микаева С.А.** Разработка практических рекомендаций по использованию светодиодов при освещении общественных зданий // Справочник. Инженерный журнал. 2016. № 6 (231). С. 55—60.

#### Ссылка для цитирования

Амелькина С.А., Амелькин Э.А., Дупленкова К.А., Микаева С.А. Проект освещения квартала г. Саранск светодиодными светильниками // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 6. С. 265—267.









#### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681

**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, **Н.Ю. Борисенко** (ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Nikolay.Zubov@rsce.ru

# КОВАРИАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ ПРОГРАММНОЙ ТРАЕКТОРИИ ОБЛЁТА ПРИ СБЛИЖЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В детерминированной постановке для математической модели относительного движения космических аппаратов при их сближении разработан ковариационный регулятор, обеспечивающий синтез высокоточной обратной связи на участке облёта. В основу регулятора положен алгоритм синтеза ковариационного управления, который построен с использованием оригинальной декомпозиции модели движения космического аппарата. Получены простые аналитические формулы расчёта ковариационного регулятора и приведены результаты моделирования отслеживания программной траектории облёта при сближении космических аппаратов.

**Ключевые слова:** космический аппарат; сближение космических аппаратов; ковариационный регулятор.

The covariance regulator, which ensures the synthesis of high-precision feedback on the section of trial flight is developed in the deter ministic formulation for the mathe matical model of the r elative motion of s pacecraft, when they approach each other. The regulator is based on the c ovariance control synthesis algorithm, which is constructed using the original decomposition of the s pacecraft movement model. Simple analytical formulas for calculating the covariance regulator are obtained and the r esults of modeling the tracking of the pr ogram flight path during the approach of spacecraft are presented.

**Keywords:** spacecraft; spacecraft approaching; covariance regulator.

Введение. В практике пилотируемых полётов при сближении космических аппаратов (КА) участок облёта является неотъемлемым элементом процесса их относительного движения и необходим для выхода на заданный стыковочный узел. В качестве математической модели при решении задачи облёта, как правило, используется модель сближения в лучевой системе координат [1, 2]. В данной работе рассматривается возможность использования математической модели в орбитальной системе координат, и тогда уравнения относительного движения КА при сближении имеют вид [3, 4]

$$\begin{pmatrix}
\dot{x}_1 \\
\dot{x}_2 \\
\dot{x}_3 \\
\dot{x}_4 \\
\dot{x}_5 \\
\dot{x}_6
\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}
0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 2\omega & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
0 & -2\omega & 3\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & -\omega^2 & 0
\end{pmatrix} \begin{pmatrix}
x_1 \\
x_2 \\
x_3 \\
x_4 \\
x_5 \\
x_6
\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}
0 & 0 & 0 \\
1 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 1 & 0 \\
0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 1
\end{pmatrix} \begin{pmatrix}
u_1 \\
u_2 \\
u_3
\end{pmatrix}$$
(1)





lacktriangle

или

 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, (2)$ 

где  $x = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6)^{\mathsf{T}}, \ u = (u_1 \ u_2 \ u_3)^{\mathsf{T}},$   $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2\omega & 3\omega^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \ B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$ 

 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = y, x_4 = \dot{y}, x_5 = z, x_6 = \dot{z}$  — фазовые координаты активного KA;  $\omega$  = const — орбитальная угловая скорость пассивного KA;  $u_1, u_2, u_3$  — ускорения двигателей в каждом канале управления.

Алгоритм синтеза ковариационного управления. Для синтеза управления облётом КА (2) воспользуемся алгоритмом, основанным на построении ковариационного регулятора [5]. В соответствии с работой [5] для системы (2) предполагаем, что все состояния доступны для обратной связи, а матрица  $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{n \times r}$  имеет полный ранг ковариации состояния замкнутой системы  $\mathbf{X}$  с регулятором  $\mathbf{K}$  и удовлетворяет следующему уравнению Ляпунова:

$$(A + BK)X + X(A + BK)^{T} + BB^{T} = 0.$$
 (3)

В соответствии с функционалом Летова— Калмана вида

$$J = \frac{1}{2} \int_{0}^{\infty} (\mathbf{x}^{\mathsf{T}} \boldsymbol{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^{\mathsf{T}} \boldsymbol{R} \mathbf{u}) dt,$$

где Q и R — соответствующие матрицы.

Введением декомпозиции аналогично работам [5—8] можно сформулировать следующий алгоритм [5] задания ковариационной матрицы X > 0 и построить ковариационный регулятор.

Первый шаг. 1.1. Для L = ce li(n/r) - 1 > 0 выполняется декомпозиция МІМО-системы (1) следующего вида:

нулевой (исходный) уровень

$$A_0 = A, B_0 = B, Q_0 = Q;$$
 (4)

первый уровень

$$A_1 = B_0^{\perp} A_0 B_0^{\perp T}, \ B_1 = B_0^{\perp} A_0 U_{0,*}, \ Q_1 = B_0^{\perp} Q_0 B_0^{\perp T}; (5)$$

k-й (промежуточный) уровень

$$A_{k} = B_{k-1}^{\perp} A_{k-1} B_{k-1}^{\perp T}, B_{k} = B_{k-1}^{\perp} A_{k-1} U_{k-1,*},$$

$$Q_{k} = B_{k-1}^{\perp} Q_{k-1} B_{k}^{\perp T};$$
(6)

L-й (конечный) уровень

$$A_{L} = B_{L-1}^{\perp} A_{L-1} B_{L-1}^{\perp T}, B_{L} = B_{L-1}^{\perp} A_{L-1} U_{L-1,*},$$

$$Q_{L} = B_{L-1}^{\perp} Q_{L-1} B_{L-1}^{\perp T}.$$
(7)

Следует заметить, что для полностью управляемой МІМО-системы (2) матрица  $\boldsymbol{B}_L$  из выражения (7) должна иметь полный ранг по строкам либо быть невырожденной, либо — ненулевым скаляром. При этом матрица  $\boldsymbol{B}_L^{\perp} = 0$ .

Кроме выполнения декомпозиции системы для каждого уровня помимо L-го необходимо выполнять SVD-разложение матриц  $\boldsymbol{B}$  с соответствующим нижним индексом по формуле

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{U} \boldsymbol{\Sigma} \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{U}_{*} \mid \boldsymbol{U}_{\perp}) \left(\frac{\boldsymbol{\Sigma}}{\boldsymbol{0}}\right) \boldsymbol{V}^{\mathrm{T}},$$

при этом справедливы соотношения

$$\boldsymbol{B}^{\perp} = \boldsymbol{U}_{\perp}^{\mathrm{T}}; \; \boldsymbol{B}^{+} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{\Sigma}^{-1}\boldsymbol{U}_{*}^{\mathrm{T}},$$

где  $U_{\perp}$  — матрица размера  $n \times (n-r)$ , транспонирование которой даёт левый полуортогональный делитель нуля матрицы B;  $U_*$  — матрица размера  $n \times r$ , участвующая в вычислении псевдообратной матрицы Мура—Пенроуза.

- 1.2. Назначается матрица  $X_L$  как произвольная положительно-определённая матрица.
- 1.3. Назначаются произвольная матрица  $Z_L$  и произвольная косоэрмитова матрица  $S_L = -S_L^{\mathsf{T}}$ , затем вычисляется ковариационный регулятор для конечного уровня по формуле

$$K_{L} = -\frac{1}{2} B_{L}^{+} (A_{L} X_{L} + X_{L} A_{L}^{T} + Q_{L}) X_{L}^{-1} + + B_{L}^{+} S_{L} B_{L} B_{L}^{+} X_{L}^{-1} + V_{L} Z_{L}.$$
(8)

1.4. Назначается произвольная положительно-определённая матрица  $\mathbf{R}_L > 0$  и обновляется матрица ковариации  $\mathbf{X}_{L-1}$  по формуле

$$X_{L-1} = (U_{L-1,*} \mid \boldsymbol{B}_{L-1}^{\perp \mathsf{T}}) \times \left( \frac{\boldsymbol{R}_L + \boldsymbol{K}_L \boldsymbol{X}_L \boldsymbol{K}_L^{\mathsf{T}} \mid \boldsymbol{K}_L \boldsymbol{X}_L}{\boldsymbol{X}_L \boldsymbol{K}_L^{\mathsf{T}} \mid \boldsymbol{X}_L} \right) \left( \frac{\boldsymbol{U}_{L-1,*}^{\mathsf{T}}}{\boldsymbol{B}_{L-1}^{\perp}} \right).$$
(9)

Второй шаг. Пункты 1.3 и 1.4 повторяются для (L-1)-го уровня декомпозиции с получением выражений

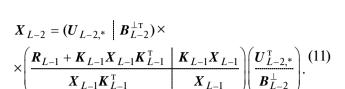
$$K_{L-1} = -\frac{1}{2} B_{L-1}^{+} (A_{L-1} X_{L-1} + X_{L-1} A_{L-1}^{\mathsf{T}} + Q_{L-1}) \times$$

$$\times (I + B_{L-1}^{\perp \mathsf{T}} B_{L-1}^{\perp}) X_{L-1}^{-1} +$$

$$+ B_{L-1}^{+} S_{L-1} B_{L-1} B_{L-1}^{+} X_{L-1}^{-1} + V_{L-1} Z_{L-1};$$
(10)



 $\bigoplus$ 



L-й шаг. Пункты 1.3 и 1.4 повторяются для первого уровня декомпозиции с использованием выражений

$$K_{1} = -\frac{1}{2} \boldsymbol{B}_{1}^{+} (\boldsymbol{A}_{1} \boldsymbol{X}_{1} + \boldsymbol{X}_{1} \boldsymbol{A}_{1}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{1}) \times \times (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{B}_{1}^{\perp \mathrm{T}} \boldsymbol{B}_{1}^{\perp}) \boldsymbol{X}_{1}^{-1} + \boldsymbol{B}_{1}^{+} \boldsymbol{S}_{1} \boldsymbol{B}_{1} \boldsymbol{B}_{1}^{+} \boldsymbol{X}_{1}^{-1} + \boldsymbol{V}_{1 \perp} \boldsymbol{Z}_{1};$$

$$(1 \ 2)$$

$$\boldsymbol{X}_{0} = (\boldsymbol{U}_{0^{*}} \mid \boldsymbol{B}_{0}^{\perp T}) \left( \frac{\boldsymbol{R}_{1} + \boldsymbol{K}_{1} \boldsymbol{X}_{1} \boldsymbol{K}_{1}^{T} \mid \boldsymbol{K}_{1} \boldsymbol{X}_{1}}{\boldsymbol{X}_{1} \boldsymbol{K}_{1}^{T} \mid \boldsymbol{X}_{1}} \right) \left( \frac{\boldsymbol{U}_{0,*}^{T}}{\boldsymbol{B}_{0}^{\perp}} \right). (13)$$

*Конечный шаг.* Здесь формируется конечный регулятор по формуле

$$K_{0} = \left(\frac{1}{2}\boldsymbol{B}_{0}^{+}(\boldsymbol{A}_{0}\boldsymbol{X}_{0} + \boldsymbol{X}_{0}\boldsymbol{A}_{0}^{\mathsf{T}} + \boldsymbol{Q}_{0}) \times \times (\boldsymbol{I}_{n} + \boldsymbol{B}_{0}^{\perp\mathsf{T}}\boldsymbol{B}_{0}^{\perp}) - \boldsymbol{B}_{0}^{+}\boldsymbol{S}\boldsymbol{B}_{0}\boldsymbol{B}_{0}^{+}\right) \boldsymbol{X}_{0}^{-1},$$
(14 )

где S — произвольная косоэрмитова матрица.

Следует заметить, что на каждом уровне декомпозиции должно соблюдаться следующее условие:

$$\boldsymbol{B}_{l}^{\perp}(\boldsymbol{A}_{l}\boldsymbol{X}_{l}+\boldsymbol{X}_{l}\boldsymbol{A}_{l}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}_{l})\boldsymbol{B}_{l}^{\perp \mathrm{T}}=\boldsymbol{0},\ l=\overline{0,L}.\ (15)$$

**Ковариационный регулятор управления об- лётом.** Для системы (2) с использованием выражений (8)—(14) с нулевым и первым уровнем декомпозиции будем иметь:

а) матрицы нулевого уровня декомпозиции

$$\begin{split} & \boldsymbol{A}_0 = \boldsymbol{A}; \;\; \boldsymbol{B}_0 = \boldsymbol{B}; \\ & \boldsymbol{B}_0^{\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \\ & \boldsymbol{B}^+ = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \end{split}$$

Положительно-определённую матрицу Q считаем известной, и она имеет следующий диагональный вид:

$$\boldsymbol{Q} = \begin{pmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_6 \end{pmatrix}$$

Сингулярное разложение матрицы  $\textbf{\textit{B}}$  запишем так

т. е

$$\boldsymbol{U}_{0,*} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \ \boldsymbol{U}_{0\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}};$$

б) матрицы первого уровня декомпозиции

$$\begin{aligned} \boldsymbol{A}_1 &= \boldsymbol{B}_0^{\perp} \boldsymbol{A}_0 \boldsymbol{B}_0^{\perp \mathsf{T}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \\ \boldsymbol{B}_1 &= \boldsymbol{B}_0^{\perp} \boldsymbol{A}_0 \boldsymbol{U}_{0,*} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}; \\ \boldsymbol{Q}_1 &= \boldsymbol{B}_0^{\perp} \boldsymbol{Q}_0 \boldsymbol{B}_0^{\perp \mathsf{T}} = \begin{pmatrix} q_1 & 0 & 0 \\ 0 & q_5 & 0 \\ 0 & 0 & q_3 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Сингулярное разложение матрицы  $B_1$  запишем так

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

или

$$\boldsymbol{U}_{0,*} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}, \ \boldsymbol{U}_{0\perp} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Псевдообратная матрица  $B_1$  представляет собой  $B_1^{-1}$  и имеет следующее значение:

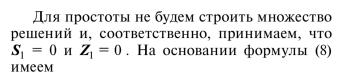
$$\boldsymbol{B}_1^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} = \boldsymbol{B}_1.$$

Назначаем матрицу ковариации

$$\boldsymbol{X}_1 = \begin{pmatrix} x_1 & 0 & 0 \\ 0 & x_2 & 0 \\ 0 & 0 & x_2 \end{pmatrix}.$$







$$K_{1} = -\frac{1}{2}B_{1}^{+}(A_{1}X_{1} + X_{1}A_{1}^{T} + Q_{1})X_{1}^{-1} =$$

$$= \begin{pmatrix} q_{1}/2x_{1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{3}/2x_{3} \\ 0 & -q_{5}/2x_{2} & 0 \end{pmatrix}.$$

Выберем произвольную положительноопределённую матрицу  $\mathbf{R}_1$ :

$$\mathbf{R}_1 = \begin{pmatrix} r_1 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 \end{pmatrix}$$

и вычислим матрицу ковариации  $X_0$  в соответствии с выражением (13). В результате получим

$$\boldsymbol{X}_{0} = (\boldsymbol{U}_{0^{*}} \mid \boldsymbol{B}_{0}^{\perp T}) \begin{pmatrix} \boldsymbol{R}_{1} + \boldsymbol{K}_{1} \boldsymbol{X}_{1} \boldsymbol{K}_{1}^{T} \mid \boldsymbol{K}_{1} \boldsymbol{X}_{1} \\ \boldsymbol{X}_{1} \boldsymbol{K}_{1}^{T} \mid \boldsymbol{X}_{1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{U}_{0,*}^{T} \\ \boldsymbol{B}_{0}^{\perp} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} x_{1} & -q_{1}/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -q_{1}/2 & q_{1}^{2}/4x_{1} + r_{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_{3} & -q_{3}/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -q_{3}/2 & q_{3}^{2}/4x_{3} + r_{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{2} & -q_{5}/2 \\ & & -q_{5}/2 & -q_{5}^{2}/4x_{2} + r_{3} \end{pmatrix} .$$

Осуществим проверку, согласно которой на основании условия (15) будем иметь

$$\boldsymbol{B}_{0}^{\perp}(\boldsymbol{A}_{0}\boldsymbol{X}_{0}+\boldsymbol{X}_{0}\boldsymbol{A}_{0}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}_{0})\boldsymbol{B}_{0}^{\perp\mathrm{T}}=\boldsymbol{0}_{6\times6}.$$

Следовательно, X удовлетворяет матричному уравнению (15), и выражение конечной формулы регулятора на основании (14) запишем так

$$K_{0} = \left(\frac{1}{2}\boldsymbol{B}_{0}^{+}(\boldsymbol{A}_{0}\boldsymbol{X}_{0} + \boldsymbol{X}_{0}\boldsymbol{A}_{0}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{0}) \times \right) \times \left(\boldsymbol{I}_{n} + \boldsymbol{B}_{0}^{\perp \mathrm{T}}\boldsymbol{B}_{0}^{\perp})\boldsymbol{X}_{0}^{-1}\right) = (1 \quad 6)$$

$$= \begin{pmatrix} k_{11}^{0} & k_{12}^{0} & k_{13}^{0} & k_{14}^{0} & 0 & 0 \\ k_{21}^{0} & k_{22}^{0} & k_{23}^{0} & k_{24}^{0} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{35}^{0} & k_{36}^{0} \end{pmatrix},$$

где 
$$k_{11}^{0} = -\frac{q_{1}^{4} + 8q_{1}^{2}r_{1}x_{1} + 4q_{2}q_{1}x_{1}^{2} + 16r_{1}^{2}x_{1}^{2}}{16r_{1}x_{1}^{3}};$$
 (1 7) 
$$k_{12}^{0} = -\frac{q_{1}^{3} + 4q_{1}r_{1}x_{1} + 4q_{2}x_{1}^{2}}{8r_{1}x_{1}^{2}};$$

$$\begin{split} k_{13} &= \frac{q_3 \omega (x_3 q_1^2 + x_1 q_3^2 + 4r_1 x_1 x_3 + 4r_2 x_1 x_3)}{8r_2 x_1 x_3^2}; \\ k_{14} &= \frac{\omega (x_3 q_1^2 + x_1 q_3^2 + 4r_1 x_1 x_3 - 4r_2 x_1 x_3)}{4r_2 x_1 x_3}; \\ k_{21} &= -\frac{q_1 \omega (x_3 q_1^2 + x_1 q_3^2 + 4r_1 x_1 x_3 + 4r_2 x_1 x_3)}{8r_1 x_1^3 x_3}; \\ k_{22} &= -\frac{\omega (x_3 q_1^2 + x_1 q_3^2 - 4r_1 x_1 x_3 + 4r_2 x_1 x_3)}{4r_1 x_1 x_3}; \\ k_{23} &= -\frac{q_3^4 + 8q_3^2 r_2 x_3 + 4q_4 q_3 x_3^2 + 16r_2^2 x_3^2}{16r_2 x_3^3}; \\ k_{24} &= -\frac{q_3^3 + 4q_3 r_2 x_3 + 4q_4 x_3^2}{8r_2 x_3^2}; \\ k_{35} &= -\frac{q_5^4 + 8q_5^2 r_3 x_2 + 4q_6 q_5 x_2^2 + 16r_3^2 x_2^2 - 16\omega^2 r_3 x_2^3}{16r_3 x_2^3}; \\ k_{36} &= -\frac{q_5^3 + 4q_5 r_3 x_2 + 4q_6 q_5}{8r_2 x_3^2}. \end{split}$$

Следовательно, выражения (16) и (17) представляют собой аналитический ковариационный регулятор задачи стабилизации программной траектории облёта при сближении КА.

**Численный пример.** В качестве численного примера рассмотрим задачу отслеживания программной траектории облёта при сближении KA, которая формируется согласно методу свободных траекторий при условии, что по всем трём каналам начальные и конечные скорости облёта равны нулю, время облёта принято равным 650 с. Координаты начала и окончания облёта составляют:  $x_1^0 = 600 \,\mathrm{m}$ ,  $x_2^0 = 200 \,\mathrm{m}$ ,  $x_3^0 = 200 \,\mathrm{m}$ ,  $x_1^k = 300 \,\mathrm{m}$ ,  $x_2^k = x_3^k = 0$ . Облёт осуществляется на круговой орбите с  $\omega = 0,001 \, 1/\mathrm{c}$ .

Поскольку для решения задачи управления необходимо выбрать ряд параметров, то матрицы  $Q_0$ ,  $X_1$  и  $R_1$  при моделировании имели следующие значения:

$$Q_0 = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2,0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2,0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2,0 \end{pmatrix};$$

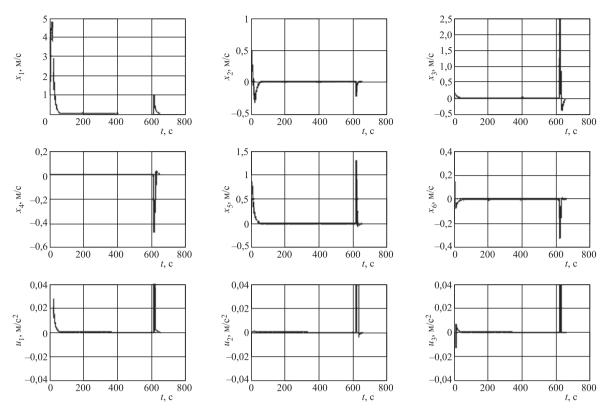
$$X_1 = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{pmatrix}; R_1 0 = R_0 = \begin{pmatrix} 0,2 & 0 & 0 \\ 0,2 & 0 \\ 0 & 0 & 0,2 \end{pmatrix}.$$

Соответственно, численное решение для матрицы ковариационного управления на момент начала действия корректирующего

**(** 







Графики переходных процессов отклонения вектора состояния при отслеживании программной траектории облёта и значения корректирующего управления

управления, рассчитанное с использованием выражений (16) и (17), равно

$$\boldsymbol{K}_{\text{cov}} = \begin{pmatrix} -0,498 & 5,09 & 1,84 \cdot 10^{-4} & 2,08 \cdot 10^{-4} & 0 & 0 \\ 1,84 \cdot 10^{-4} & 2,08 \cdot 10^{-4} & -0,498 & 5,09 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,498 & -0,498 \end{pmatrix}.$$

Графики переходных процессов задачи синтеза ковариационного управления стабилизацией программной траектории облёта приведены на рисунке. Первые шесть графиков представляют собой переходные процессы вектора состояния в отклонениях, а седьмой, восьмой и девятый — значения корректирующего управления в каждом канале. Анализ графиков показывает, что ковариационный регулятор обеспечивает высокую точность управления и хорошее качество переходных процессов.

Заключение. Для математической модели шестого порядка разработан ковариационный регулятор в детерминированной постановке, обеспечивающий синтез высокоточной обратной связи. В основу регулятора положен ранее предложенный авторами алгоритм синтеза ковариационного управления, который построен с использованием оригинальной декомпози-

ции модели движения космического аппарата. Получены простые аналитические формулы

расчёта ковариационного регулятора и приведены результаты моделирования отслеживания программной траектории.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 18-19-00004).

#### Библиографические ссылки

- 1. **Буков В.Н., Зубов Н.Е.** Релейное управление на основе алгоритма с прогнозирующей моделью // Автоматика и телемеханика. 1986. № 6. С. 36—42.
- 2. **Зубов Н.Е.** Синтез управляющих сигналов с помощью прогнозирующей модели в системе управления КА с релейными исполнительными органами // Космические исследования. 1989. Т. 27. № 5. С. 682—690.
- 3. **Зубов Н.Е.** Синтез управления сближением по методу свободных траекторий на основе алгоритма с прогнозирующей моделью // Космические исследования. 1990. Т. 28. № 4. С. 506—512.
- 4. **Зубов Н.Е.** Управление объектами с релейноимпульсными и непрерывными рулевыми органами на основе алгоритма с прогнозирующей моделью и его приложение в динамике сближения КА // Космические исследования. 1989. Т. 27. № 2. С. 206—213.





- $\bigoplus$
- 5. **Зубов Н.Е., Мисриханов М.Ш., Рябченко В.Н.** Синтез законов ковариационного управления космическим аппаратом // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 6. С. 153—167.
- 6. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Олейник А.С., Ефанов Д.Е. Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2014. № 5. С. 3—17.
- 7. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Олейник А.С., Рябченко В.Н. Терминальное релейноимпульсное управление линейными стационарными

динамическими системами // Известия РАН. Теория и системы управления. 2014. № 3. С. 134—149.

8. 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.

Ссылка для цитирования

Микрин Е.А., Комаров М.В., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Борисенко Н.Ю. Ковариационное управление стабилизацией программной траектории облёта при сближении космических аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 6. С. 268—273.

УДК 629.7.025.76

**А.Г. Бюшгенс,** д-р техн. наук, **О.В. Дружинин, В.С. Карлин,** канд. техн. наук, **А.В. Корнушенко,** канд. техн. наук, **О.В. Кудрявцев, О.В. Павленко,** канд. техн. наук (Центральный аэрогидродинамический институт, г. Жуковский)

olga.v.pavlenko@yandex.ru

# ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПОВОРОТА МОТОГОНДОЛ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА КОНЦЕ КРЫЛА, НА АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Проведены экспериментальные и расчётные исследования обтекания летательного аппарата с поворотными мотогондолами на конце прямого крыла с утолщённым профилем. Показано влияние поворота мотогондол на аэродинамические характеристики. Произведена замена исходного профиля на новый с лучшими аэродинамическими характеристиками. Рассмотрено влияние отклонения флаперонов. Расчёт проведён с помощью программы, основанной на численном решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса.

**Ключевые слова:** утолщённый профиль крыла; поворотные мотогондолы; аэродинамические характеристики; расчётные методы.

Experimental and calculated investigations of the air craft flow with rotatable motonacelles on the end of a straight wing with a thickened profile were carried out. The influence of the motonacelles rotation on aerodynamic characteristics is shown. The original profile is replaced with a new one with better aerodynamic characteristics. The influence of f laperon deviation is considered. The calculation is carried out u sing a program based on a numerical solution of the Navier-Stokes equations averaged over the Reynolds equation.

**Keywords:** thickened wing profile; rotary motonacelles; aerodynamic characteristics; calculation methods.

Введение. Проектирование новых летательных аппаратов (ЛА) обычно связано с анализом интерференции частей новой конструкции и результатов расчётных и экспериментальных работ, что в свою очередь может повлечь изменения в первоначальном варианте ЛА или его частей. Так, в ЦАГИ в аэродинамической трубе Т-102 были проведены экспериментальные исследования аэродинамических характеристик ЛА нового типа с поворотными мотогондолами на конце крыла (рис. 1) [1].

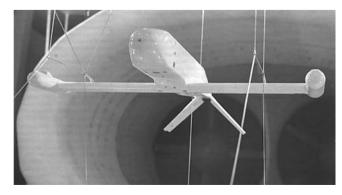


Рис. 1. Общий вид ЛА







Важнейшим элементом ЛА, в наибольшей степени определяющим его аэродинамические качества, является крыло. Сравнительно небольшие изменения геометрических характеристик профилей крыльев влекут за собой существенные различия в их аэродинамических характеристиках. При выборе профиля крыла необходимо учитывать не только его аэродинамические свойства, но и условия компоновки, интерференцию с другими частями конструкции (мотогондолой), возможность конструктивного выполнения, весовые данные и т. п. [2].

Форма профиля крыла играет важную роль в аэродинамике ЛА типа «конвертоплан», совмещающих в себе черты самолёта на режиме крейсерского полёта и вертолёта на режимах взлёта и посадки. Для ЛА такого типа используют утолщённые профили крыла, которые могут выдерживать довольно большую нагрузку и в то же время обладают хорошими аэродинамическими характеристиками.

Изначально был предложен профиль с относительной толщиной  $\bar{c}=21$  %, однако для обеспечения необходимых характеристик был

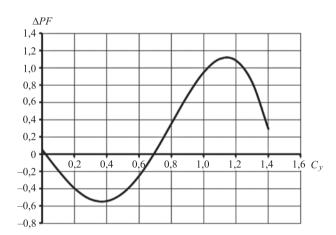
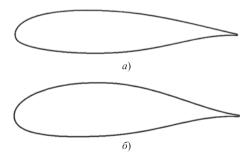


Рис. 2. Влияние замены профиля и уменьшения хорды крыла на увеличение параметра продолжительности полёта в рабочем диапазоне коэффициента подъёмной силы



**Рис. 3. Общий вид профиля крыла:** a — исходный профиль крыла;  $\delta$  — новый профиль

крыла

у п и **N** 

спроектирован новый профиль с относительной толщиной  $\overline{c}=24$  %. При проектировании нового профиля решались задачи по уменьшению площади крыла, обдуваемой винтами на режимах взлёта и посадки, при неизменной строительной высоте крыла (для обеспечения прочности конструкции), более высоких значениях параметра продолжительности полёта

$$PF = \frac{C_y^{3/2}}{C_x}$$

на режиме барражирования ( $C_y \approx 1$ ) и при высоком значении максимального коэффициента подъёмной силы (для обеспечения приемлемой скорости сваливания на самолётных режимах). Влияние замены профиля и изменения хорды крыла на продолжительность полёта показано на рис. 2.

При проектировании компоновки были также использованы результаты, полученные в работе [3].

Исходный и новый (спроектированный) профили крыла показаны на рис. 3.

Численное исследование аэродинамических характеристик конвертоплана подобного типа (см. рис. 1) при обтекании потоком вязкого газа проведено по программе ANSYS FLUENT, основанной на численном решении осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, на структурированной сетке с неотклонёнными ( $\delta_{\phi \pi} = 0$ ) и отклонёнными на различные углы флаперонами ( $\delta_{\text{фл}} = 30$  и 70°). В данной работе использована методика расчёта, хорошо зарекомендовавшая себя в ранее проведённых работах при исследовании отрывных течений около тел сложной формы [4]: использована модель турбулентности  $k-\epsilon$ «realizable» с улучшенным моделированием параметров турбулентности вблизи стенки и учётом влияния градиента давления. Расчёт проведён в диапазоне углов атаки  $\alpha = -5...26^{\circ}$ и углов скольжения  $\beta = 0$  ...  $20^{\circ}$  при числах M = 0.084 и  $Re = 0.8 \cdot 10^6$  в соответствии с условиями эксперимента.

Проектирование профиля крыла. Для проектирования профиля крыла применён генетический алгоритм оптимизации в сочетании с XFOIL в качестве прямого метода определения аэродинамических характеристик. Использована параметризация профиля, описанная в статье [5].

Суть метода состоит в том, что каждый профиль кодируется определённым набором «генов» — параметров, описывающих его гео-





метрию. На первом шаге оптимизации создаётся « популяция» профилей со случайными «генами». В результате расчёта характеристик каждому профилю ставится в соответствие значение целевой функции. Значения целевой функции определяют вероятности «скрещивания» данного профиля с остальными. В соответствии с этими вероятностями происходит «скрещивание» профилей — обмен случайными частями «генов». Кроме того, с небольшой вероятностью случайный «ген» профиля из нового поколения меняется случайным образом (аналогия с мутацией). В результате формируется новая «популяция» профилей и процесс повторяется с определения аэродинамических характеристик каждого профиля. Для нашей задачи в качестве целевой функции используется параметр продолжительности полёта.

Необходимо учесть, что максимизировать нужно не профильное значение параметра продолжительности, а его величину в итоговой компоновке. Сделать это строго не представляется возможным до определения конечной геометрии ЛА. Для нахождения приближённого значения параметра продолжительности полёта для крыла конечного размаха можно учесть индуктивное сопротивление:

$$C_{xi} = \frac{C_y^2}{\pi \lambda e}.$$

Таким образом, получим

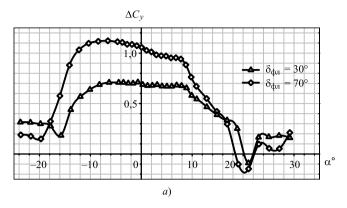
$$PF = \frac{C_y^{3/2}}{C_x + \frac{C_y^2}{\pi \lambda e}}.$$

Для данного ЛА в связи с ограничениями по минимальной строительной высоте крыла профиль проектировался таким образом, чтобы его относительная толщина и хорда крыла соответствовали установленному ограничению.

Влияние отклонения флаперонов на аэродинамические характеристики ЛА и шарнирные моменты. Далее расчёт и эксперимент были проведены с новым профилем крыла.

Отклонение флаперонов на большие углы  $(\delta_{\phi\pi}=70^\circ)$  связано с целесообразностью уменьшения обдуваемой площади крыла при вертикальном положении мотогондолы  $(\delta_{\text{мот}}=90^\circ)$ .

Сравнение расчётных и экспериментальных данных показало удовлетворительную качественную сходимость аэродинамических величин (рис. 4—6). Как в расчёте, так и в эксперименте отклонение флаперонов на докритических углах атаки увеличивает подъ-



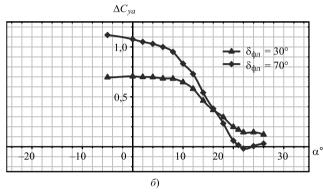
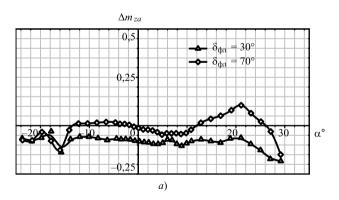


Рис. 4. Приращение коэффициента подъёмной силы конвертоплана при отклонении флаперонов ( $\beta = 0$ ): a — эксперимент;  $\delta$  — расчёт



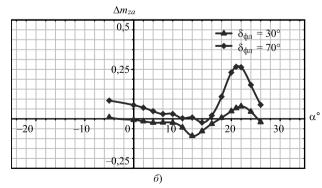
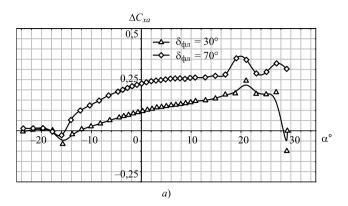


Рис. 5. Приращение коэффициента момента тангажа конвертоплана при отклонении флаперонов ( $\beta = 0$ ): a — эксперимент;  $\delta$  — расчёт









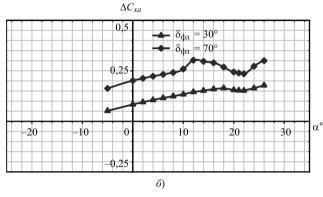


Рис. 6. Приращение коэффициента сопротивления конвертоплана при отклонении флаперонов ( $\beta=0$ ):

a — эксперимент;  $\delta$  — расчёт

ёмную силу и сопротивление ЛА и оказывает незначительное влияние на момент тангажа при отклонении флаперона на 30°.

Приращения аэродинамических коэффициентов от углов отклонения флаперонов показано на рис. 4—6, где

$$\begin{split} &\Delta C_{ya} = C_{ya\delta_{\Phi\pi}=30^{\circ}} - C_{ya\delta_{\Phi\pi}=0^{\circ}}; \\ &\Delta C_{ya} = C_{ya\delta_{\Phi\pi}=70^{\circ}} - C_{ya\delta_{\Phi\pi}=0^{\circ}}; \\ &\Delta m_{za} = m_{za\delta_{\Phi\pi}=30^{\circ}} - m_{za\delta_{\Phi\pi}=0^{\circ}}; \\ &\Delta m_{za} = m_{za\delta_{\Phi\pi}=70^{\circ}} - m_{za\delta_{\Phi\pi}=0^{\circ}}; \\ &\Delta C_{xa} = C_{xa\delta_{\Phi\pi}=30^{\circ}} - C_{xa\delta_{\Phi\pi}=0^{\circ}}; \\ &\Delta C_{xa} = C_{xa\delta_{\Phi\pi}=70^{\circ}} - C_{xa\delta_{\Phi\pi}=0^{\circ}}. \end{split}$$

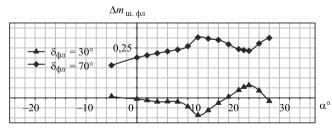


Рис. 7. Приращение коэффициента шарнирного момента флаперона при его отклонении в зависимости от угла атаки ( $\beta=0$ )

Приращение величин шарнирных моментов в зависимости от углов отклонения флаперонов представлено на рис. 6, где

$$\Delta m_{\text{III } \Phi \pi} = m_{\text{III } \Phi \pi \delta_{\Phi \pi} = 30^{\circ}} - m_{\text{III } \Phi \pi \delta_{\Phi \pi} = 0};$$
  
$$\Delta m_{\text{III } \Phi \pi} = m_{\text{III } \Phi \pi \delta_{\Phi \pi} = 30^{\circ}} - m_{\text{III } \Phi \pi \delta_{\Phi \pi} = 0}.$$

Коэффициенты шарнирных моментов рассчитаны относительно оси вращения флаперона по формуле

$$m_{\text{ui} \, \text{$\varphi$},\text{$\pi$}} = \frac{M_{\text{ui} \, \text{$\varphi$},\text{$\pi$}}}{S_{\text{$\varphi$},\text{$\eta$}} q_{\text{$\omega$}} b_{\text{$\varphi$},\text{$\eta$}}},$$

где  $M_{\rm m}$   $_{\rm фл}$  — момент относительно оси вращения флаперона;  $S_{\rm фл}$  — габаритная площадь проекции флаперона на плоскость XOZ;  $q_{\infty}$  — скоростной напор;  $b_{\rm фл}$  — габаритная хорда флаперона.

Увеличение угла поворота флаперона повышает величину его шарнирного момента в зависимости от углов атаки (рис. 7). Согласно расчёту, наименьшее влияние на величину шарнирного момента оказывает поворот флаперона на  $30^{\circ}$  в диапазоне докритических углов атаки  $-5^{\circ} \le \alpha \le 10^{\circ}$ .

Влияние отклонения флаперонов на распределение давления и картину обтекания ЛА. По распределению коэффициента давления в сечении средней аэродинамической хорды крыла на угле атаки  $\alpha = 4^\circ$  видно, что при увеличении угла отклонения флаперона увеличивается разрежение на верхней поверхности крыла и возрастает давление на его нижней поверхности (рис. 8).

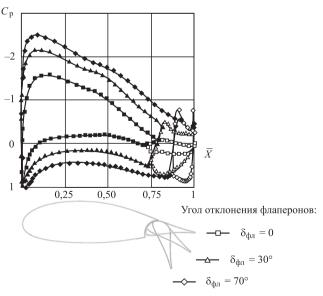
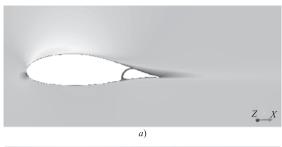
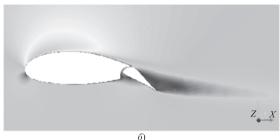


Рис. 8. Распределение коэффициента давления в сечении САХ крыла ЛА ( $\alpha=4^{\circ},~\beta=0,~\delta_{\phi\pi}=0$ )







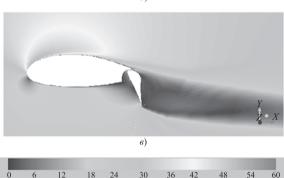


Рис. 9. Распределение скоростей в плоскости YOZ сечения САХ крыла ЛА ( $\alpha=4^{\circ}, \beta=0$ ):  $a-\delta_{\phi\pi}=0; \delta-\delta_{\phi\pi}=30^{\circ}; e-\delta_{\phi\pi}=70^{\circ}$ 

Распределение скоростей в плоскости YOZ сечения средней аэродинамической хорды (CAX) крыла конвертоплана на угле атаки  $\alpha=4^\circ$  в соответствии со шкалой скорости (м/с) показано на рис. 9. Вследствие большой относительной толщины профиля ( $\bar{c}=24\%$ ) на конце крыла даже с неотклонённым флапероном наблюдается утолщение пограничного слоя (рис. 9, a), а при отклонении флаперона ( $\delta_{\phi \pi}=30$  и  $70^\circ$ ) на нём происходит срыв потока (рис. 9, a), что приводит к увеличению сопротивления.

Влияние поворота мотогондолы, расположенной на конце крыла, на его обтекание и аэродинамические характеристики. Согласно расчёту, разворот мотогондолы в диапазоне углов  $\delta_{\text{мот}} = 0...90^{\circ}$  (рис. 10) оказывает влияние на все аэродинамические

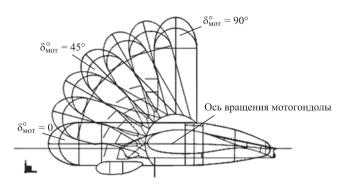


Рис. 10. Общий вид мотогондолы и углы её отклонения

характеристики конвертоплана в зависимости от угла атаки. Приращение аэродинамических характеристик вследствие поворота мотогондолы, где  $\Delta C_y = C_{y\delta_{\text{MOT}}>0} - C_{y\delta_{\text{MOT}}=0},$   $\Delta C_x = C_{x\delta_{\text{MOT}}>0} - C_{x\delta_{\text{MOT}}=0},$   $\Delta m_z = m_{z\delta_{\text{MOT}}>0} - m_{z\delta_{\text{MOT}}=0},$ представлено на рис. 11 и 12. Данное приращение, характеризующееся как разность между аэродинамическими характеристиками конвертоплана с отклонённой и неотклонённой мотогондолой, показывает, что при этом уменьшается подъёмная сила, увеличиваются сопротивление и момент тангажа на кабрирование. Показано, что для всего расчётного диапазона углов атаки ( $\alpha = -5...26^{\circ}$ ) аэродинамическое качество конвертоплана снижается при отклонении поворотной части мотогондолы на углы более  $30^{\circ}$  (рис. 12,  $\delta$ ). Нужно отметить, что с ростом угла атаки уси-

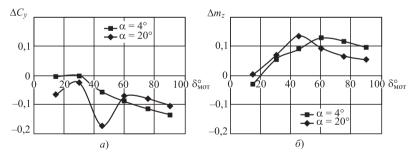


Рис. 11. Приращение подъёмной силы и момента тангажа вследствие поворота мотогондолы

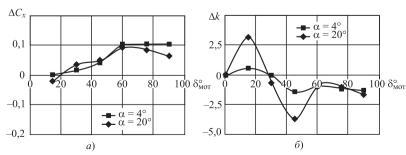


Рис. 12. Приращение сопротивления (a) и аэродинамического качества (б) вследствие поворота мотогондолы



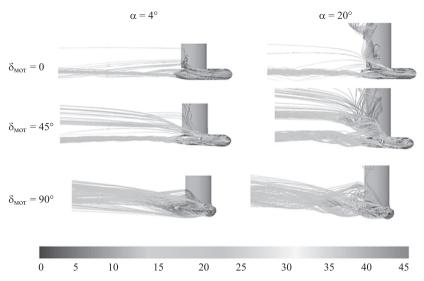
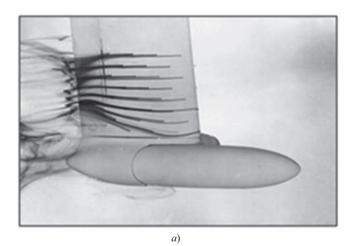
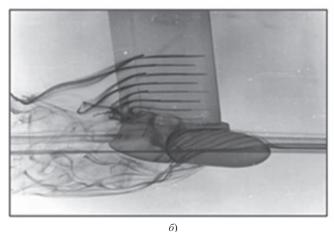


Рис. 13. Предельные линии тока правой мотогондолы в цвете шкалы скорости, м/с

ливается нелинейность приращения аэродинамических коэффициентов по углу отклонения поворотной части мотогондолы. Как показывают расчёты (рис. 13) и эксперимент





(рис. 1 4), эта нелинейность вызвана вихревым течением, которое возникает при обтекании мотогондолы и оказывает влияние на аэродинамические характеристики крыла.

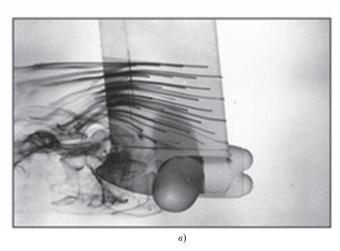
Для оценки влияния поворота мотогондолы на коэффициент подъёмной силы по размаху крыла было проведено интегрирование распределения давления в 12 сечениях консоли крыла  $C_y = \int\limits_{x_0}^x \Delta C_p dx$  при различных положениях мотогондолы. Влияние отклонения мотогондолы на изменение подъёмной силы в различных сечениях консоли крыла показано на рис. 15, где относительный размах консо-

ли крыла  $\overline{z}$  равен координате z, отнесённой к длине консоли L:  $\overline{z} = z/L$ . Видно, что чем больше угол атаки, тем больше влияние угла отклонения мотогондолы на подъёмную силу по размаху крыла.

Величина шарнирного момента поворотной части мотогондолы, кроме угла её поворота, также зависит от угла атаки. Зависимость коэффициента шарнирного момента (рис. 16) определена относительно оси вращения поворотной части мотогондолы по формуле

$$m_{\text{III MOT}} = \frac{M_{\text{III MOT}}}{S_{\text{MOT}} q_{\infty} b_{\text{MOT}}},$$

где  $M_{\text{ш мот}}$  — момент относительно оси вращения мотогондолы;  $S_{\phi\pi}$  — габаритная площадь проекции мотогондолы на плоскость XOZ;  $q_{\infty}$  — скоростной напор;  $b_{\text{мот}}$  — габаритная хорда мотогондолы.



24.05.2018 11:01:47

Рис. 14. Визуализация обтекания мотогондолы при её повороте на различных углах атаки (эксперимент):  $a-\delta_{\text{mot}}=0;~\delta-\delta_{\text{mot}}=45^\circ;~s-\delta_{\text{mot}}=90^\circ$ 

**Y** 

Показано, что на углах атаки  $\alpha=4$  и  $20^\circ$  максимальная величина шарнирного момента поворотной части мотогондолы наблюдается в диапазоне  $45^\circ \leqslant \delta_{\text{мот}} \leqslant 60^\circ$  в зависимости от угла атаки.

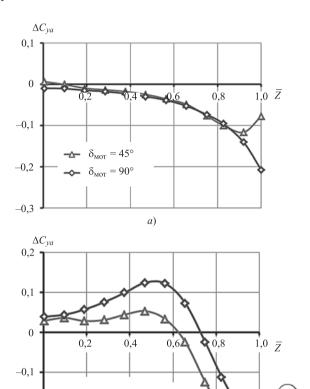


Рис. 15. Приращение подъёмной силы в зависимости от сечений консоли крыла при повороте мотогондолы:

6)

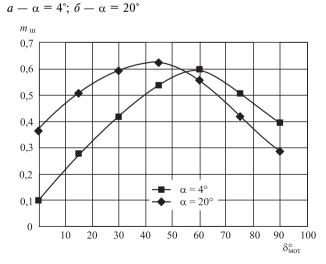


Рис. 16. Зависимости коэффициента шарнирного момента от угла поворота мотогондолы

**Заключение.** Экспериментальные и расчётные исследования обтекания ЛА, проведённые в условиях натурного полёта при числах M = 0.084 и  $Re = 0.8 \cdot 10^6$ , показали следующее:

на докритических углах атаки увеличение угла отклонения флаперонов увеличивает подъёмную силу ЛА и сопротивление;

величина шарнирного момента флаперона увеличивается при увеличении угла его поворота и угла атаки;

разворот мотогондолы, расположенной на конце крыла, в диапазоне углов  $\delta_{\text{мот}} = 0...90^{\circ}$  оказывает влияние на все аэродинамические характеристики конвертоплана в зависимости от угла атаки: уменьшает подъёмную силу, увеличивает сопротивление и момент тангажа на кабрирование;

с увеличением угла атаки возрастает влияние отклонения мотогондолы на подъёмную силу по размаху крыла;

при увеличении угла атаки величина шарнирного момента мотогондолы возрастает на меньших углах её поворота.

Результаты расчёта удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

В дальнейших работах планируется рассмотреть динамику полёта данного летательного аппарата с вращающимися лопастями винта на мотогондолах на концах крыла.

#### Библиографические ссылки

- 1. Новости ЦАГИ. № 1(113), 2016. С. 7.
- 2. **Мартынов А.К.** Прикладная аэродинамика. М.: Машиностроение, 1972. С. 222, 224.
- 3. Корнушенко А.В., Кудрявцев О.В., Теперин Л.Л., Теперина Л.Н., Шустов А.В., Орфинежад Ф.Э., Мьё Тхейн. Исследование полезной интерференции тянущей и толкающей схемы воздушных винтов, установленных на концах крыла // Учёные записки ЦАГИ. 2017. Т. XLVIII. № 1. С. 3—9.
- 4. **Павленко О.В.** Численное исследование особенностей обтекания модели крыла с имитаторами льда // Ученые записки ЦАГИ. 2016. Т. X LVII. № 1. С. 62—68.
- 5. **Николаев Н.В.** Параметрическое описание профиля крыла с использованием составных полиномиальных функций для решения задач оптимизации // Ученые записки ЦАГИ. 2015. Т. XLVI. № 7. С. 23—29.

Ссылка для цитирования

Бюшгенс А.Г., Дружинин О.В., Карлин В.С., Корнушенко А.В., Кудрявцев О.В., Павленко О.В. Численные и экспериментальные исследования влияния поворота мотогондол, установленных на конце крыла, на аэродинамические характеристики летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 6. С. 273—279.



-0,2

-0,3





УДК 629.7

**Г.П. Шибанов,** д-р техн. наук, проф. (Государственный лётно-испытательный центр им. В.П. Чкалова, г. Ахтубинск) gpshibanov@mail.ru

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КОДИРОВАНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ГРАФИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Предлагаются методы кодирования и распознавания графической документации, которые могут быть реализованы современными цифровыми вычислительными средствами, в том числе бортовыми ЭВМ и персональными компьютерами. Излагаются теоретические основы указанных методов и приводятся конкретные рекомендации, позволяющие решить задачу распознавания графической документации при сравнительно небольшом массиве предварительно запоминаемой информации. Особое внимание уделяется вопросам упрощения распознающих алгоритмов и повышения достоверности результатов распознавания путём выделения и использования признаков, инвариантных к повороту, сдвигу, перемещению и изменению масштаба распознаваемого изображения.

**Ключевые слова:** автоматизация; признаки распознавания; кодирование графической документации; алгоритмы; методы.

The methods for encoding and recognition of graphic documentation that can be r ealized with modern digital calculating facilities, including on-board computers and personal computers are offered. Theoretical bases of the specified methods are stated and concrete recommendations allowing to solve a problem of the graphic documentation recognition with a r elatively small array of pr eviously memorized information are given. Particular attention is given to simplifying recognition algorithms and increasing the reliability of recognition results by isolating and using criterions that are invariant to rotation, shift, displacement and change in the scale of the recognized image.

**Keywords:** automation; recognition criterions; coding of graphic documentation; algorithms; methods.

Введение. Большинство прикладных задач, в которых требуется построить автоматический процесс классификации исходной информации по определённым признакам, наиболее эффективно может быть решено на основе использования методов теории распознавания образов. К таким задачам, в частности, относятся распознавание различной графической документации [1-3], акустических сигналов и звуков речи [4, 5], логических структур информации и изображений на экранах радиолокаторов [6, 7]. На базе теории распознавания образов могут быть решены задачи по расшифровке аэрофотоснимков, технической диагностике и прогнозированию возможных отказов сложных технических систем, например, авиационной техники [8—10].

В статье рассмотрены три метода кодирования и распознавания графической документации, которые в основе могут быть использованы для решения большинства из указанных задач. Даны рекомендации, позволяющие автоматизировать процесс распознавания графической документации и решить эту задачу

при сравнительно небольшом массиве предварительно запоминаемой информации.

Сущность рассматриваемых методов сводится к известной последовательности выполнения двух этапов распознавания: подготовительного, в результате реализации которого должны быть получены критерии, характеризующие эталонный образ, и этапа непосредственного распознавания, в процессе которого определяются критерии, характеризующие распознаваемое изображение, и сравниваются с соответствующими критериями, характеризующими эталонный образ.

Отличительными особенностями рассматриваемых методов являются принципы предварительного кодирования распознаваемых изображений и критерии, по которым проводится процесс идентификации. Во всех случаях в качестве входного чувствительного элемента читающего автомата, сопряжённого с компьютером (вычислительным комплексом) предполагается использование устройства типа « иконоскоп», развёртка которого квантуется генератором стандартной частоты. При







этом для каждой точки квантования в запоминающее устройство компьютера поступает величина напряжения (например, в виде унифицированного кода), пропорциональная в данных точках коэффициенту контрастности распознаваемого изображения.

Для удобства изложения условно обозначим рассматриваемые методы через A, B и C.

Метод А позволяет осуществить распознавание изображений, имеющих значительные деформации относительно эталонных образов (поворот изображений до 180°, соответствующее изменение их масштабов, смещения и т. д.). Однако он является и наиболее сложным с точки зрения технической реализации. При данном методе распознавание ведётся по нескольким уровням контрастности изображения, появляющегося на экране иконоскопа. В связи с этим весь диапазон значений выходных величин (например, напряжений  $U_0$ , снимаемых с иконоскопа) от ( $U_0$ ) $_{
m min}$  до  $(\check{U_0})_{\mathrm{max}}$  предварительно разбивается на m равных участков. Причём і-му участку этого диапазона будут соответствовать все величины напряжения  $U_0$ , находящиеся в интервале

$$\begin{split} &(U_0)_{\min} + (i-1) \frac{(U_0)_{\max} - (U_0)_{\min}}{m} \Rightarrow \\ &\Rightarrow (U_0)_{\min} + i \frac{(U_0)_{\max} - (U_0)_{\min}}{m}. \end{split}$$

Например, самым тёмным местам изображения по аналогии с выражением (1) будут соответствовать величины напряжения, находящиеся в интервале

$$(U_0)_{\min} \Rightarrow (U_0)_{\min} + \frac{(U_0)_{\max} - (U_0)_{\min}}{m}.$$

Второму (более светлому) участку будет соответствовать интервал напряжений

$$(U_0)_{\min} + \frac{(U_0)_{\max} - (U_0)_{\min}}{m} \Rightarrow$$
  
 $\Rightarrow (U_0)_{\min} + 2 \frac{(U_0)_{\max} - (U_0)_{\min}}{m}$  и т. д.

Через точки изображения, соответствующие одному уровню контрастности (например, через точки, относящиеся к самому тёмному участку изображения), способом наименьших квадратов проводится кривая второго порядка, описываемая в общем случае уравнением вида

$$ax^{2} + 2bxy + cy^{2} + 2dx + 2ey + f = 0$$
, (2)

а затем определяются её инварианты

$$\Delta = \begin{vmatrix} a & b & d \\ b & c & e \\ d & e & f \end{vmatrix}; \ \delta = \begin{vmatrix} a & b \\ b & c \end{vmatrix} \ \text{M} \ S = a + c. \ (3)$$

Инварианты (3) являются характеристиками образа для данного (фиксированного) уровня контрастности его изображений, не зависящими от положения распознаваемых изображений в поле зрения входного устройства читающего автомата.

Обозначим инварианты эталонного образа через  $\Delta_0$ ,  $\delta_0$ ,  $S_0$ .

Если рассматривать образ, который требуется опознать по определённым, заранее выбранным уровням контрастности его изображений, то аналогично можно получить инварианты и этого образа (для выбранных уровней контрастности) —  $\Delta$ ,  $\delta$ , S.

Необходимым (но в общем случае не достаточным) критерием того, что рассматриваемый образ соответствует эталонному, являются следующие соотношения:

$$\frac{\Delta}{\Delta_0} = \frac{\delta}{\delta_0} = \left(\frac{S}{S_0}\right)^2, (4)$$

которые должны выполняться с некоторой допустимой точностью, устанавливаемой в ходе эксперимента.

Если соотношения (4) не соблюдаются, то можно утверждать, что рассматриваемый образ не соответствует эталонному.

Отметим, что характерной особенностью соотношений (4) является то, что они не зависят от изменения масштабов распознаваемых изображений относительно масштаба эталонного образа. Эта особенность математически может быть выражена в виде соотношения

$$m = \frac{\Delta}{\Delta_0} = \frac{\delta}{\delta_0} = \left(\frac{S}{S_0}\right)^2, (5)$$

где m — величина, являющаяся характеристикой изменения масштаба распознаваемого изображения по сравнению с эталонным образом.

Как уже указывалось, условие (4) распознавания образа является лишь необходимым. Это же относится и к условию (5).

В зависимости от характера множества эталонных образов, их количества и степени различимости могут быть использованы дополнительные признаки, устанавливающие степень





 $^{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{}}}}}}}}}}}$ 

соответствия фактического образа и эталонного. Однако следует отметить, что в отдельных случаях условия (4), относящегося к одной характеристической кривой (2), может оказаться достаточно, если число эталонных образов невелико, а степень несоответствия значительна.

В противном случае, можно использовать дополнительные характеристические вые, проведённые, например, по более светлым участкам. Кроме того, поле изображения можно разбить на несколько частей, и в каждой части провести свою характеристическую кривую, которую можно использовать для дополнительной оценки соответствия эталонного и рассматриваемого образов.

При применении дополнительных характеристических кривых, кроме условия (4) появляются дополнительные критерии оценок соответствия образов:

$$x^* = \frac{be - cd}{\delta} \quad \text{и} \quad y^* = -\frac{bd - ae}{\delta} \quad \text{при } \delta \neq 0; \quad (6)$$

$$ax^* + by^* + \frac{ad + be}{S} = 0;$$

$$\left(d + \frac{de - bd}{S}\right)x^* + \left(e + \frac{ae - bd}{S}\right)y^* + f = 0\right)$$
при  $\delta = 0,$  (7)

где  $x^*$ ,  $y^*$  — координаты центра кривых (или вершины параболы при  $\delta = 0$ ).

tg2
$$\alpha = \frac{2b}{a-c}$$
 при  $\delta \neq 0$ ;  
tg $\alpha = -\frac{a}{b}$  при  $\delta = 0$ , (8)

где а — угол поворота осей кривой относительно её канонического положения.

Критерий (5) указывает на то, что величина т с некоторым допуском должна быть постоянной как для всего изображения, так и для его части (или другого уровня контрастности).

Для величин  $x^*$  и  $y^*$  значения

$$x^* - (x^*)_0$$
 и  $y^* - (y^*)_0$  (9)

не должны (с некоторым допуском) изменяться при переходе от одной части изображения (или от всего изображения) к другой его части (или к другому уровню контрастности).

Соответственно, значение разности

$$\alpha - \alpha_0 (1 \quad 0)$$

не должно изменяться при переходе от одной части изображения к другой.

В формулах (9) и (10) обозначения с нулевым индексом и без него соответствуют эталонному и рассматриваемому изображениям.

Для ускорения процесса распознавания образов все они предварительно группируются в несколько независимых групп. Причём в качестве основного признака группирования берётся вид характеристических кривых, которыми описываются распознаваемые образы (эллипсы, параболы, гиперболы, пересекающиеся прямые и т. д.). Например, известно, что при  $\delta > 0$  и  $\Delta = 0$  таким признаком будет эллипс, при  $\delta < 0$  и  $\Delta \neq 0$  — гипербола, при  $\delta < 0$  и  $\Delta = 0$  — пара пересекающихся прямых, при  $\delta = 0$  и  $\Delta \neq 0$  — парабола, при  $\delta = 0$  и  $\Delta = 0$  — пара параллельных или сливающихся прямых. Поэтому, определив значения инвариантов δ и Δ, можно с уверенностью судить о том, каким типом кривой описывается распознаваемый по данному уровню контрастности образ или отдельный его участок.

Так как каждый эталонный образ хранится в «памяти» компьютера в виде одной или нескольких (в зависимости от количества принятых уровней контрастности распознаваемых изображений и количества отдельных участков, на которые они предварительно разбиваются) групп предельных (экстремальных) значений инвариантов, т. е. в виде  $(\Delta_0)_{\rm max}$ ,  $(\Delta_0)_{\rm min}$ ;  $(\delta_0)_{\text{max}}, (\delta_0)_{\text{min}}; (S_0)_{\text{max}}, (S_0)_{\text{min}},$  то непосредственно процесс распознавания может быть сведён к следующим этапам:

- 1) вычисление по коэффициентам уравнений (определяемым методом наименьших квадратов) их инвариантов:
- 2) определение по значениям инвариантов групп образов, к которым относится распознаваемое изображение:
- 3) выполнение дополнительных условий и соотношений (5)...(10);
- 4) последовательное сравнение вычисленных значений инвариантов с соответствующими им эталонными экстремальными значениями.

При этом, если окажется, что все вычисленные значения инвариантов укладываются в установленные для них пределы, изображение (или его отдельный участок) по данному уровню контрастности считается принадлежащим к данному образу. Если же хотя бы один из инвариантов не укладывается по своей величине в установленные пределы, то в зависимости от того, меньше эта величина минимального эталонного значения или больше максимального эталонного значения соответствующего





 $^{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{\scriptsize{}}}}}}}}}}}$ 



инварианта, осуществляется условный переход в одну из двух соседних ячеек «памяти» компьютера.

После этого описанный процесс сравнения повторяется до тех пор, пока вычисленные значения инвариантов не войдут в установленные для них расчётные пределы, т. е. пока изображение не будет опознано.

Рассмотренный метод автоматически может быть реализован по представленному алгоритму на любом универсальном компьютере или с помощью специализированного вычислителя, функциональная схема которого описана, например, в работе [4].

Метод В основан на теории чувствительности. При данном методе на подготовительном этапе образ рассматривается с меньшим шагом квантования, чем на этапе непосредственного распознавания. Целесообразность этого определяется необходимостью получения данных об образе не только в тех точках, по которым на втором этапе он будет распознаваться, но и об окрестностях этих точек. Указанные данные позволяют получить приближённые производные по смещению изображения, его развороту по отношению к считывающему устройству и изменению масштаба.

На этапе непосредственного распознавания предполагается, что изображение может несколько не совпадать с закреплённым в «памяти» компьютера эталонным образом. Кроме того, предполагается, что рассматриваемое изображение может быть несколько смещено или повёрнуто, а масштаб изображения может несколько отличаться от того, который «запомнил» компьютер на подготовительном этапе. При непосредственном распознавании ставится цель исключить указанные неточности путём определения корректирующих поправок, которые компенсируют указанные смещения и деформации. Сущность данного метода состоит в следующем.

Функцию выходного напряжения U рассматриваемого образа, пропорциональную контрастности в зависимости от координат x и y (по ширине и высоте изображения), можно представить в общем виде

$$U = f(x, y, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5),$$
 (11)

где  $x_1$  — смещение изображения по оси x;  $x_2$  — смещение изображения по оси y;  $x_3$  — угол поворота изображения;  $x_4$  — коэффициент изменения масштаба по оси x;  $x_5$  — коэффициент изменения масштаба по оси y.

Будем считать, что деформации  $x_3$ ,  $x_4$  и  $x_5$  происходят относительно центра изображения. Однако это обстоятельство, как показывают результаты анализа, не сужает возможности решения задачи, а вызывает лишь перераспределение между ошибками  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ ,  $x_4$ ,  $x_5$ . Перечисленные ошибки  $x_1$ , ...,  $x_5$  не являются для метода В единственными. Они могут быть изменены и, например, дополнены ошибками, связанными с перспективными искажениями.

Основное требование, предъявляемое к этим ошибкам, состоит лишь в том, что они не должны быть слишком большими, поскольку определение корректирующих поправок решается на основе линейного представления ошибок  $x_i$  (i=1,2,...,5) относительно функции U.

Определим ошибку в величине напряжения U как

$$\Delta = U - U_0, \qquad 12)$$

где  $U_0$  — величина напряжения, соответствующая эталонному образу, хранящемуся в «памяти» компьютера.

В зависимости от ошибок  $x_i$  (i = 1, 2, ..., 5) при линейном разложении функции (12) может быть получено соотношение

$$\Delta = \frac{d\Delta}{dx_1}x_1 + \frac{d\Delta}{dx_2}x_2 + \dots + \frac{d\Delta}{dx_5}x_5. \quad (1 \quad 3)$$

Значение производных  $\frac{d\Delta}{dx_1}, \frac{d\Delta}{dx_2}, ..., \frac{d\Delta}{dx_5}$  обозначим буквами a, b, c, d, e. Тогда выражение (13) примет вид

$$\Delta = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 + ex_5$$
. (14)

Обозначим через n число дискретных точек, в которых будут определяться функции U и  $\Delta$ .

В этом случае можно записать n уравнений, подобных уравнению (14)

$$\Delta_{1} = a_{1}x_{1} + b_{1}x_{2} + c_{1}x_{3} + d_{1}x_{4} + e_{1}x_{5};$$

$$\Delta_{2} = a_{2}x_{1} + b_{2}x_{2} + c_{2}x_{3} + d_{2}x_{4} + e_{2}x_{5};$$

$$...$$

$$\Delta_{n-1} = a_{n-1}x_{1} + b_{n-1}x_{2} + c_{n-1}x_{3} + d_{n-1}x_{4} + e_{n-1}x_{5};$$

$$\Delta_{n} = a_{n}x_{1} + b_{n}x_{2} + c_{n}x_{3} + d_{n}x_{4} + e_{n}x_{5}.$$
(15)

Предполагается, что  $n \ge 5$ . При n < 5 имеет место несовместная система уравнений.





Для её решения предъявим к системе требование

$$\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2 = \left(\sum_{i=1}^{n} \Delta_i^2\right)_{\min}. \quad (1$$

В этом случае с учётом требования (16) система уравнений (15) приводится к виду

$$[a^2]x_1 + [ab]x_2 + \dots + [ae]x_5 = [a\Delta];$$
 
$$[ab]x_1 + [b^2]x_2 + \dots + [be]x_5 = [b\Delta];$$
 
$$\dots$$
 
$$[ae]x_1 + [be]x_2 + \dots + [e^2]x_5 = [e\Delta],$$
 
$$\text{где } [a^2] = \sum_{i=1}^n a_i^2, \ [ab] = \sum_{i=1}^n a_i b_i \ \text{и т. д.}$$

Система уравнений (17) может быть предварительно решена путём определения обратной матрицы, поскольку производные a, b, c, d, e для данного образа будут представлять собой постоянные числа. Результатом её решения будут следующие выражения:

$$\begin{aligned} x_1 &= \alpha_1 \Delta_1 + \alpha_2 \Delta_2 + \ldots + \alpha_n \Delta_n = [\alpha \Delta]; \\ x_2 &= \beta_1 \Delta_1 + \beta_2 \Delta_2 + \ldots + \beta_n \Delta_n = [\beta \Delta]; \\ \cdots \\ x_5 &= \varepsilon_1 \Delta_1 + \varepsilon_2 \Delta_2 + \ldots + \varepsilon_n \Delta_n = [\varepsilon \Delta], \end{aligned}$$
 (1 8)

где  $\alpha$ ,  $\beta$ , ...,  $\epsilon$  — числа, являющиеся для данного образа постоянными.

Компенсация ошибок  $\Delta$  вследствие смещений и деформаций образа реализуется следующими соотношениями:

Для упрощения вычислительного процесса соотношения (19) могут быть преобразованы следующим образом:

$$\begin{split} & \breve{\Delta}_i = \Delta_1 - (a_1 x_1 + b_1 x_2 + \ldots + e_1 x_5) = \\ & = \Delta_i - [a_i (\alpha_1 \Delta_1 + \alpha_2 \Delta_2 + \ldots + \alpha_n \Delta_n)] - \\ & - [b_i (\beta_1 \Delta_1 + \beta_2 \Delta_2 + \ldots + \beta_n \Delta_n) + \ldots + \\ & + e_i (\varepsilon_1 \Delta_1 + \varepsilon_2 \Delta_2 + \ldots + \varepsilon_n \Delta_n)] = \\ & = (-a_i \alpha_1 - b_i \beta_1 - \ldots - e_i \varepsilon_1) \Delta_1 + \\ & + (-a_i \alpha_2 - b_i \beta_2 - \ldots - e_i \varepsilon_2) \Delta_2 + \ldots + \\ & + (1 - a_i \varepsilon_i - b_i \beta_i - \ldots - e_i \varepsilon_i) \Delta_i + \ldots + \\ & + (-a_i \alpha_n - b_i \beta_n - \ldots - e_i \varepsilon_n) \Delta_n = \\ & = m_{i1} \Delta_1 + m_{i2} \Delta_2 + \ldots + m_{in} \Delta_n, \end{split}$$

где

lacktriangle

$$m_{i1} = -a_i \alpha_1 - b_i \beta_1 - \dots - e_i \varepsilon_1;$$

$$m_{i2} = -a_i \alpha_2 - b_i \beta_2 - \dots - e_i \varepsilon_2;$$

$$\dots$$

$$m_{ii} = 1 - a_i \alpha_i - b_i \beta_i - \dots - e_i \varepsilon_i;$$

$$\dots$$

$$m_{in} = -a_i \alpha_n - b_i \beta_n - \dots - e_i \varepsilon_n.$$

Таким образом, соотношения (19) можно привести к виду

где

$$m_{ij} = -(a_i\alpha_j + b_i\beta_j + \dots + e_i\varepsilon_j)$$
 при  $i \neq j$ ,  $m_{ij} = 1 - (a_i\alpha_j + b_i\beta_j + \dots + e_i\varepsilon_j)$  при  $i = j$ . (2 1)

Коэффициенты  $m_{ij}$  представляют собой постоянные числа, характеризующие данный образ. Эти числа составляют симметричную матрицу, т. е.

$$m_{ij}=m_{ji},\,(\qquad \qquad 22)$$

поэтому в «памяти» компьютера можно хранить не все коэффициенты, число которых равно  $n^2$ , а только примерно половину  $\frac{n(n+1)}{2}$ .

Критерием соответствия рассматриваемого образа эталону может служить соотношение

$$\left| (\check{\Delta})^2 \right| \geqslant S, \ (2$$
 3)

где S — допустимая сумма квадратов ошибок  $\check{\Delta}_i$  , определяемая экспериментальным путём.

В соответствии с полученным результатом для реализации первого этапа распознавания целесообразно использовать универсальный компьютер с устройством, обеспечивающим дискретный съём информации, описывающей эталонный образ. При этом компьютер вычисляет производные a, b, c, d, e и решает систему уравнений (15) с учётом условия (16) до получения коэффициентов  $m_{ij}$  по формулам (21).

В процессе вычисления производных a, b, c, d, e для каждой точки идентифицируемой графической документации определяются приращения функции  $U_0$ . Приращения в направлении осей x и y служат для определения производных a и b. Для определения произ-







водной c по повороту распознаваемого изображения относительно экрана иконоскопа определяется приращение, перпендикулярное радиусу-вектору, проведённому из центра изображения (начало координат) до точки с координатами (x, y). При этом производная получается как результат комбинации приращений функции  $U_0$  в направлениях x и y. Производные d и e вычисляются аналогично.

Для сглаживания функции  $U_0$  и, следовательно, для усиления сходимости процесса коррекции при больших деформациях распознаваемого изображения, следует стремиться получить значение контрастности и соответствующее ему значение напряжения  $U_0$  не с точки, а с некоторой площади, что может быть достигнуто необходимым увеличением диаметра считывающего луча иконоскопа (или некоторой расфокусировкой системы считывания). Однако при чрезмерном увеличении диаметра считывающего луча могут исчезнуть некоторые существенные детали изображения. Поэтому вопрос об оптимальном диаметре считывающего луча должен решаться каждый раз применительно к тем изображениям, которые будут распознаваться.

Второй этап распознавания реализуется на основе вычислений, осуществляемых по формулам (12), (20) и (23) с использованием накопленных на первом этапе и записанных в «память» компьютера или специализированного вычислителя значений функции  $U_0$  и коэффициентов  $m_{ij}$ . Такого типа вычислитель может быть построен, например, по функциональной схеме, приведённой в работе [5].

**Метод С** может быть применён в случаях, когда отдельные чёрно-белые изображения плоских геометрических фигур, относящиеся к одному и тому же образу, отличаются друг от друга и от изображения, принятого за эталонный образ, на незначительную величину (не более чем на 3 %).

Отличие данного метода от рассмотренных методов А и В состоит в первую очередь в том, что в нём в качестве критериев, характеризующих эталонный образ, приняты математические ожидания числа «чёрных» точек (в каждой строке и столбце разложения), полученных по одному уровню контрастности при многократном разложении различных изображений, относящихся к одному и тому же образу. Это позволяет снимать сигналы с устройства развёртки изображения по принципу «да»—«нет», заключающемуся в фиксации появления либо отсутствия импуль-

сов на выходе иконоскопа при прохождении его развёртывающим лучом мест по строкам (столбцам) разложения изображений с соответствующими уровнями контрастности. Последнее приводит к упрощению конструкции читающего автомата. Так, например, отпадает потребность в применении преобразователей уровней напряжения в код, уменьшается необходимый объём « памяти» компьютера, упрощается сравнивающее устройство (в качестве его можно использовать реверсивный счётчик) и т. д.

В целях обеспечения независимости результатов распознавания от изменения освещённости изображений перед началом процесса распознавания (второго этапа) определяют истинный минимальный уровень контрастности, условно соответствующий наличию «чёрной» точки при данной освещённости распознаваемого изображения. Для этого в поле зрения считывающего устройства помещают соответствующее нижнему предельному значению контрастности изображение (например, сплошную затемнённую фигуру в виде круга) и фиксируют получившееся на его выходе значение сигнала. Полученное значение принимают за эталонное, и по нему устанавливают нижний предел срабатывания устройства формирования выходных импульсов. При этом импульсы будут выдаваться лишь при прохождении развёртываюшего луча иконоскопа через точки изображения, соответствующие определённому уровню контрастности или превышающему его на заранее установленную допустимую величину.

В методе С первый (подготовительный) этап процесса распознавания сводится к тому, что по большому количеству изображений, принадлежащих определённому образу, вычисляют математическое ожидание *т* числа «чёрных» точек отдельно для каждой строки и для каждого столбца разложения. Так, если число строк разложения будет равным  $n_1$  и столбцов  $n_2$ , то, соответственно, для каждого образа будет определено по  $(n_1 + n_2)$  значений m. Причём в данном случае в «память» компьютера при числе распознаваемых образов, равном n, всего будет записано  $(n_1 \times n) + (n_2 \times n)$ значений т. Если записать т с индексами і,  $\mu, j$  в виде  $(m_i)_i$  и  $(m_{ii})_i$ , где i — номер строки разложения распознаваемых изображений; j — номер распознаваемого изображения, то все математические ожидания т могут быть записаны в «память» компьютера в виде матрицы (24) с числом столбцов j = 1, 2, ..., n и







строк  $i = 1, 2, ..., n_1$  и матрицы (25) с числом столбцов  $\mu = 1, 2, ..., n_2$  и строк j = 1, 2, ..., n:

$$(m_{1})_{1}, (m_{1})_{2}, ..., (m_{1})_{n-1}, (m_{1})_{n};$$

$$(m_{2})_{1}, (m_{2})_{2}, ..., (m_{2})_{n-1}, (m_{2})_{n};$$

$$...$$

$$(m_{n1})_{1}, (m_{n1})_{2}, ..., (m_{n1})_{n-1}, (m_{n1})_{n};$$

$$(m_{1})_{1}, (m_{2})_{1}, ..., (m_{n2-1})_{1}, (m_{n2})_{1};$$

$$(m_{1})_{2}, (m_{2})_{2}, ..., (m_{n2-1})_{2}, (m_{n2})_{2};$$

$$...$$

$$(m_{1})_{n}, (m_{2})_{n}, ..., (m_{n2-1})_{n}, (m_{n2})_{n}.$$

$$(2 4)$$

$$(2 5)$$

На втором этапе распознавания по каждой строке и каждому столбцу разложения последовательно определяют число «чёрных» точек в i-й строке и  $\mu$ -м столбце разложения изображений, относящихся к j-му образу. Указанная операция может быть представлена зависимостями

$$(m_i)_j - N_{ij} = |(\Delta_{mi})_j|;$$
  

$$(m_{\mu})_j - N_{\mu j} = |(\Delta_{m\mu})_j|.$$

Получившиеся в результате этой операции разности  $\left| (\Delta_{mi})_j \right|$  и  $\left| (\Delta_{m\mu})_j \right|$  записываются в «память» компьютера в виде матриц

$$(\Delta_{m1})_{1}, (\Delta_{m1})_{2}, ..., (\Delta_{m1})_{n-1}, (\Delta_{m1})_{n};$$

$$(\Delta_{m2})_{1}, (\Delta_{m2})_{2}, ..., (\Delta_{m2})_{n-1}, (\Delta_{m2})_{n};$$

$$...$$

$$(\Delta_{mn1})_{1}, (\Delta_{mn1})_{2}, ..., (\Delta_{mn1})_{n-1}, (\Delta_{mn1})_{n};$$

$$(\Delta_{m1})_{1}, (\Delta_{m2})_{1}, ..., (\Delta_{mn2-1})_{1}, (\Delta_{mn2})_{1};$$

$$(\Delta_{m1})_{2}, (\Delta_{m2})_{2}, ..., (\Delta_{mn2-1})_{2}, (\Delta_{mn2})_{2};$$

$$...$$

$$(\Delta_{m1})_{n}, (\Delta_{m2})_{n}, ..., (\Delta_{mn2-1})_{n}, (\Delta_{mn2})_{n}.$$

$$(2 6)$$

$$(2 7)$$

$$...$$

После этого путём последовательного сравнения значений ( $\Delta_{mi}$ ) $_j$  в каждой строке матрицы (26) определяют минимальную величину разности с фиксацией того, к какому образу эта разность относится, т. е. находят в первой строке разложения  $[(\Delta_{m1})_j]_{\min}$ , во второй —  $[(\Delta_{m2})_j]_{\min}$ , в третьей строке —  $[(\Delta_{m3})_j]_{\min}$  и т. д. Аналогично, путём последовательного сравнения значений ( $\Delta_{m\mu}$ ) $_j$ , находят минимальные величины разностей и в каждом столбце матрицы (27). Если в результате сравнения значений ( $\Delta_{mi}$ ) $_j$  и ( $\Delta_{m\mu}$ ) $_j$  в одной и той же строке или в одном и том же столбце разложения окажется несколько равных минимальных разностей, соответствующих разным об-

разам, например, в первой строке разложения окажется  $(\Delta_{m1})_2 = (\Delta_{m1})_5 = (\Delta_{m1})_{10} = \min$ , то все эти значения записывают в «память» компьютера со своими признаками, определяющими принадлежность каждой минимальной разности к определённому образу. Затем из всех  $n_i$ минимальных значений разностей или групп разностей, соответствующих количеству строк разложения, и из всех минимальных значений разностей или групп разностей, соответствующих количеству столбцов разложения, определяют, какое суммарное число минимальных разностей принадлежит одному и тому же образу (символу или другому распознаваемому элементу графической документации). Распознаваемое изображение приписывают образу, к которому относится максимальное количество минимальных разностей.

Для повышения достоверности результатов распознавания образов по методу С при малых (до нескольких процентов) искажениях, смещениях и поворотах распознаваемых изображений ширина (диаметр) луча опроса развёртывающего устройства принимают равным удвоенной толщине наиболее тонких линий, составляющих изображение.

**Заключение.** На основании изложенного можно сформулировать ряд практических рекомендаций.

- 1. Для повышения достоверности результатов распознавания при изменении масштаба, угла поворота и смещения опознаваемого изображения относительно эталона целесообразно изображение или его отдельные участки кодировать по заранее принятому числу дискретных уровней контрастности, выделять точки, соответствующие одному из уровней контрастности, и аппроксимировать их кривыми второго порядка.
- 2. При линейных искажениях изображений относительно эталона или искажениях, которые могут быть с достаточной для практики точностью линеаризованы, целесообразно найти смещения выбранных заранее точек опознаваемых изображений относительно координат эталона, определить частные производные по этим смещениям для корректировки поворотов, деформаций, масштабов и осуществить проверку соответствия изображения эталону по допустимой сумме квадратов ошибок отклонения распознаваемого изображения от эталона.
- 3. Распознавание стандартных символов и печатных знаков, характерных для технической документации, целесообразно осущест-







влять по математическому ожиданию числа «чёрных» точек отдельно в каждой строке и в каждом столбце разложения, независимо от координат их появления.

#### Библиографические ссылки

- 1. Шибанов Г.П., Дорогов А.Е., Пинскер И.Ш. Способ опознавания изображений плоских геометрических фигур // Авт. свид-во СССР № 179099. 1965. Бюл. № 2.
- 2. Шибанов Г.П., Дорогов А.Е., Пинскер И.Ш. Способ опознавания образов // Авт. свид-во СССР № 180861. 1966. Бюл. № 4.
- 3. Шибанов Г.П., Дорогов А.Е., Пинскер И.Ш. Способ опознавания чёрно-белых изображений // Авт. свид-во СССР № 204026. 1967. Бюл. № 21.
- 4. **Шибанов Г.П.** Распознавание в системах автоконтроля. М.: Машиностроение, 1973. 428 с.
- 5. **Контроль** функционирования больших систем / Под ред. Г.П. Шибанова. М.: Машиностроение, 1977. 360 с.

- 6. **Шибанов Г.П.** Контроль состояния технических систем по изменению светового фона приборных панелей // Автометрия. 1972. № 4. С. 105—109.
- 7. **Шибанов Г.П.** Оптимизация процесса контроля бортовых комплексов оборудования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2 014. № 6. С. 56—61.
- 8. **Шибанов Г.П.** Оценка эффективности автоматизации процессов контроля оборудования // Сб. «Основные вопросы теории и практики надёжности». М.: Советское радио, 1975. С. 336—342.
- 9. **Воробьёв А.А., Лагойко О.С.** Информационнодиагностические системы встроенного контроля состояния воздушных судов // Проблемные системы и вычислительные методы. 2014. № 4. С. 437—445.
- 10. **Гандурин В.А., Меркулов В.И., Харьков В.П.** Адекватность моделей в пространстве состояний // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2007. Т. 5. № 10. С. 22—29.

Ссылка для цитирования

**Шибанов Г.П.** Автоматизация процесса кодирования и распознавания графической документации // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72.  $\mathbb{N}$  6. С. 280—287.

## Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:

межотраслевой научно-технический журнал «Автоматизация. Современные технологии» успешно прошёл аккредитацию в ВАК при Минобрнауки России для публикации работ соискателей учёных степеней по отрасли науки:

05.00.00 — технические науки;

и четырём группам специальностей:

05.02.00 — машиностроение и машиноведение;

05.07.00 — авиационная и ракетно-космическая техника;

05.11.00 — приборостроение, метрология

и информационно-измерительные приборы и системы;

05.13.00 — информатика, вычислительная техника и управление.

**Напоминаем:** статьи следует подавать в редакцию заблаговременно! С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru

## Уважаемые читатели!

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

При этом ссылка на журнал обязательна.









# ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

### ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Алгоритм захвата предмета на основе тактильного распознавания его поверхности. Вестник машиностроения. 2018. № 1.

Предложено решение задачи захвата предмета с нечёткой информацией о форме и физических характеристиках его поверхности, которую можно идентифицировать с использованием экспоненциальных или робастных фильтров. Сформулированы разрешающие правила тактильного распознавания целевых узловых точек на поверхности и условие успешного захвата предмета. Предложен алгоритм формирования узловой точки на плоскости перемещения активных элементов захвата.

Разработка технологии ультразвуковой сварки разнородных пластмасс. *Вестник машиностроения*. 2018. № 1.

Рассматривается ультразвуковая сварка разнородных пластмасс, основанная на диффузии молекул на свариваемых поверхностях полимеров при температурах, соответствующих их вязкопластическому состоянию. Установлено, что одним из критериев свариваемости разнородных термопластов является совместимость их акустических свойств, оцениваемая плотностью и вязкостью расплавов.

Современная технология прокатки трамвайных желобчатых рельсов. Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 1.

Приведены результаты научно-практической работы по исследованию и промышленному освоению прокатки трамвайных желобчатых рельсов на современном рельсобалочном стане с применением чистовой непрерывной реверсивной группы клетей, а также по разработке метода определения контактных поверхностей металла с валками в очаге деформации. Предложен энергоэффективный способ прокатки в четырёхвалковых калибрах. Проведено планирование эксперимента в целях определения оптимального соотношения объёмов смещаемого металла

по элементам профиля для обеспечения равенства сил прокатки в горизонтальном направлении от обжатия вертикальными валками. Предложены оптимальные скоростные режимы прокатки, по которым определены нагрузочные диаграммы, что позволило использовать резервные мощности главного привода прокатного стана. Представлены данные по исследованию напряжённо-деформированного состояния металла при прокатке. Проведена оценка коэффициента приращения-утяжки фланцев профиля при прокатке в четырёхвалковых калибрах. На основе полученных данных предложены рекомендации по повышению качества трамвайных рельсов.

Влияние термической обработки на структуру интерметаллидного сплава на основе Ni<sub>3</sub>Al, полученного по ресурсосберегающей технологии. Заготовительные производства в машиностроении. 2018. Т. 16. № 1.

Изучена структурная и химическая неоднородность интерметаллидного сплава, полученного по ресурсосберегающей технологии с применением литейных отходов. Показано, что повышение фазовой стабильности сплава достигается в результате использования термической обработки: закалки и старения. Проведён сравнительный анализ микроструктуры, рассчитаны значения коэффициента ликвации, определён состав избыточных фаз в зависимости от температуры закалки и старения. Установлен оптимальный режим термической обработки.

Технологические исследования структуры и внешнего вида поверхности защитного покрытия. Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 1.

Статья посвящена исследованиям структуры и внешнего вида поверхности защитного покрытия на основе оксида иттербия в зависимости от числа его слоёв. Рассмотрено влияние характеристик покрытия на эффективность защиты внутренней стенки кварцевой колбы от воздействия плазмы дугового разряда низкого давления в смеси неона и аргона.

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 29.03.2018. Отпечатано в ООО «Канцлер»

Подписано в печать 24.05.2018. 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49. Формат  $60 \times 88$  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