

# Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## Главный редактор

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

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

## Адрес редакции:

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

## Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

Издаётся с 1947 г.

Том 74

7  
2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

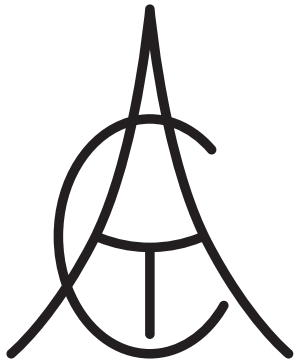
- Колыбенко Е.Н.** Формализованные знания технологических  
схем базирования объектов на их возможном множестве для  
автоматизированного решения задач практики в подготовке  
производства ..... 299
- Орлов П.С., Соцкая И.М., Адакин Р.Д.** Разработка про-  
граммного обеспечения для управления процессом очист-  
ки ультразвуком отложений с поверхностей многоразового  
фильтра ..... 308
- Бойчук М.И., Васильева Л.А., Микаева С.А.** Математиче-  
ский расчёт надёжности кварцевых резонаторов ..... 311
- Джавадов Н.Г., Казымова Ф.Т.** Информационная оценка  
результатов дистанционного зондирования почвы при изуче-  
нии распределения в ней органических веществ ..... 315

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Чьонг Ф.С.** Способ коррекции астроинерциальной системы  
летательного аппарата ..... 320
- Никифоров С.О., Кочева Т.В., Мархадаев Б.Е., Урмакши-  
нова Е.Р., Никифоров Б.С.** Особенности прототипирования  
кинематических движений конечностей человека при реали-  
зации демонстрационных роботов ..... 325
- Чан Д.М.** Разработка алгоритма настройки субоптималь-  
ного коэффициента масштабирования в задаче фильтрации  
БИНС ..... 329
- Железникова О.Е., Куршев А.Е., Богатырёв С.Д., Мика-  
ева С.А.** Влияние излучения светодиодных фитооблучате-  
лей комбинированного спектра на рост и развитие растений  
огурца ..... 335

### СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

- Мышляев Ю.И., Минкин В.О., Фиошин А.В.** Управление  
колебаниями механической системы с приводом в условиях  
параметрической неопределённости ..... 339



# Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## Chief in Editor

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

## EDITORIAL COUNCIL:

**Afanasyev V.N.** – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE

**Basarab M.A.** – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Bolshakov A.A.** – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

**Buldakova T.I.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Wang Meiling** – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,  
P.R. China

**Zinchenko L.A.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Clark R.** – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK

**Krioni N.K.** – dr.en.s., prof., USATU, Ufa

**Kuznetsov A.E.** – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan

**Maltseva S.V.** – dr.en.s., prof., NRU HSE

**Mikaeva S.A.** – dr.en.s., prof., MSUPI

**Neusypin K.A.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Nefedov E.I.** – dr.ph.-m.s., IRE RAS

**Nikiforov V.M.** – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP  
behalf of N.A. Pilyugin»

**Proletarskiy A.V.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Protalinsky O.M.** – dr.en.s., prof., NRU MPEI

**Putilov V.N.** – LLC «Innovative Mashinostroenie»  
Publishers» (deputy chief editor)

**Rumyantseva O.N.** – General Director of LLC «Innovative  
Mashinostroenie» Publishers»

**Xia Yuantsin** – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,  
P.R. China

**Fu Li** – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China

**Fedorov I.B.** – dr.en.s., prof., academician RAS, President  
of MSTU behalf of N.E. Bauman

**He Yung** – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science  
and Technology, P.R. China

**Chistyakova T.B.** – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

**Shakhnov V.A.** – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,  
MSTU behalf of N.E. Bauman

**Shibanov G.P.** – dr.en.s., prof., State Flight Test Center  
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**

Computer layout — **Konova E.V.**

## Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane – 2a, build. 2

Tel.: +7 (499) 268-41-77.

E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;

http://www.mashin.ru

## Founder:

LLC «INNOVATIVE MASHINOSTROENIE» PUBLISHERS»

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

It is published since 1947

Volume 74  $\frac{7}{2020}$

## CONTENTS

### AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

**Kolybenko E.N.** Formalized knowledge of technological schemes for basing objects on their possible multitude for the automated solution of practical problems at the production preparation . . . 299

**Orlov P.S., Sotskaya I.M., Adakin R.D.** Development of the process controlling software for deposits ultrasonic cleaning from the surfaces of a reusable filter . . . . . 308

**Boyчук M.I., Vasileva L.A., Mikaeva S.A.** Mathematical calculation of the quartz resonators reliability . . . . . 311

**Dzhavadov N.G., Kazymova F.T.** Information evaluation of the soil remote sounding results when studying the distribution of organic substances in the soil . . . . . 315

### MODERN TECHNOLOGIES

**Chyong F.S.** The correction method of the aircraft astro-inertial system . . . . . 320

**Nikiforov S.O., Kocheva T.V., Markhadaev B.E., Urmakshinova E.R., Nikiforov B.S.** Features of prototyping the kinematic movements of human extremities during the implementation of demonstration robots . . . . . 325

**Chan D.M.** Development of an algorithm for tuning a suboptimal scaling factor in the SINS filtering problem . . . . . 329

**Zheleznikova O.E., Kurshev A.E., Bogatyrev S.D., Mikaeva S.A.** The effect of radiation from LED combined spectrum phyto-irradiators on the growth and development of cucumber plants . . . . 335

### SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

**Myshlyaev Yu.I., Minkin V.O., Finoshin A.V.** Control of the mechanical system oscillation with a drive under conditions of parametric uncertainty . . . . . 339



**Е.Н. Колюбенко**, канд. техн. наук., вед. науч. сотр.  
(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)  
e.n.kolybenko@mail.ru

## ФОРМАЛИЗОВАННЫЕ ЗНАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ БАЗИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ИХ ВОЗМОЖНОМ МНОЖЕСТВЕ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРАКТИКИ В ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

*Предложена структура базы знаний для перехода технологической подготовки производства (ТПП) к информационной технологии решения задач практики автоматизации высокого уровня. Технологические схемы базирования на их возможном множестве для решения задач практики ТПП рассмотрены на основе понятия «структура» во взаимодействии элементов структуры объектов базирования и «базирующего» объекта.*

**Ключевые слова:** техническая подготовка производства; обработка резанием; системный анализ; информационная технология; моделирование решений; системотехнология.

*The structure of the knowledge base for the transition from the production technological preparation (PTP) to the information technology for solving the problems of high-level automation practice is proposed. Technological schemes of basing on their possible multitude for solving the problems of PTP practice are considered on the basis of the «structure» conception in the structural elements interaction of object basing and «basing» object.*

**Keywords:** technical preparation of production; machine cutting; system analysis; information technology; modeling solutions; system technology.

**Введение.** Автоматизированное решение задач практики ТПП по всему её циклу с использованием только математического аппарата существенно затруднено. Множественные попытки преодолеть барьер определения последовательности технологических операций по их маршруту в системе рабочих машин только средствами математики неудачны по объективным причинам. Во-первых, существует огромное разнообразие информационных и логических связей между параметрами проектного качества основных элементов интеграции в структуре объектов (детали, сборочные узлы, изделия) конструирования на их возможном множестве. Во-вторых, информационные и логические связи традиционных знаний ТПП прерваны по маршруту технологических операций при переходе от одной рабочей машины к другой, а также между стадиями ТПП и КПП (конструкторская подготовка производства). В-третьих, в основу решения всех задач практики ТПП положено оперирование средствами конструкторской элементной базы, используемой для определе-

ния объектов конструирования. Действительно, необходимые средства технологической элементной базы принципиально отличаются от средств конструкторской элементной базы. В-четвёртых, понятия традиционных знаний ТПП не связаны в необходимую систему и часто не актуализированы для решения задач формализации знаний.

В условиях информатизации всех сфер деятельности человека в ТПП используются малоэффективные диалоговые системы без выхода в САПР, работа которых организована со справочной информацией в электронном виде её отображения, а содержание осталось на прежнем уровне и носит описательный характер. Функции базы знаний — преобразование традиционных знаний ТПП по всему её циклу с выходом в САПР. Информационная модель технологических схем базирования объектов и база данных на основе её решений — инструментальные средства базы знаний для определения двух её информационных изделий, которым соответствуют реальные рабочие машины в пределах операции

и системы рабочих машин по маршруту операций. Необходимы существенные изменения содержания знаний по функциям их формализации. Только постановка задачи на автоматизированное решение задач практики ТПП по всему её циклу может выявить все возможные «огрехи» традиционных знаний. Для преодоления этих трудностей необходима не технология системотехники средствами математики, а технология системной инженерии, предложенная в работах [1, 2] средствами теории систем, системного анализа принятия решений, логических операторов теории множеств, диаграмм Венна, графов структуры теории графов.

Технология системной инженерии в её интерпретации как технология информационного логического моделирования решений задач практики предложена в работе [3]. Эта технология заложена в базу знаний ТПП механообработки в иерархии её структуры по семи уровням базовых объектов знаний различных типов. Структура базы знаний приведена на рис. 1.

Предложенная база знаний позволяет перейти к детерминированной (непрерывной, гибкой), практически значимой информационной технологии автоматизации высокого

уровня решения задач ТПП по всему её циклу. Это ещё не полная автоматизация, так как содержит элемент диалога пользователей с системой информационного логического моделирования решений на основе автоматизированного поиска решений в базах данных «прошлого» опыта проектных работ. Но уже этот уровень автоматизации обеспечивает достижение информационной технологией решения задач практики ТПП трёх основных целей их экономической эффективности:

1) оптимизация материальных и трудовых ресурсов на проектирование, изготовление конструкций, эксплуатацию средств систем производства;

2) автоматизированный выход на постпроцессоры связи с системами ЧПУ функционально различными рабочими машинами;

3) автоматизированный выход на формирование производственных подразделений (участок, цех, завод) на основе прогрессивной формы организации подетально кооперированного производства.

Использование предложенной базы знаний необходимо рассматривать как этап перехода к управлению содержанием и последовательностью технологических операций по их маршруту в системе рабочих машин более высокого уровня автоматизации. Первично необходимо накопление формализованных решений в основных инструментальных средствах базы знаний, решения должны быть идентифицированы для автоматизации их поиска. Последующий системный анализ систематизированных решений, накопленных на их возможном множестве в базах данных «прошлого» опыта практики ТПП, теперь уже на подготовленной типовой основе информационного обеспечения позволит подойти к решению задач достижения самого высокого уровня автоматизации. Примером достаточно успешной разработки такой технологии может служить алгоритм управления игрой в шахматы на компьютере. Разрабатывается алгоритм в безлюдной технологии управления транспортными средствами.

**Основная часть.** Так как рассмотрению подлежит базирование геометрических объектов, вво-



**Рис. 1.** Определение базы знаний предметной области в её иерархии по семи уровням структуры базовых объектов знаний функционально различных типов

дим понятие «технологическая схема». Решение задач базирования каких-либо объектов в технологических схемах распространено очень широко, их информационное отображение для машиностроительного производства принципиально должно иметь глубокое теоретическое обоснование. Различные предприятия механообработки накопили большой «прошлый» опыт проектирования технологических схем базирования объектов. Практическая значимость решения может быть доказана только на основе идентификации решения, что позволяет организовать автоматизированный поиск решения и возможное его заимствование.

Информационный поиск необходимого решения в базе данных «прошлого» опыта должен быть ориентирован на то, чтобы найти «иголку в стоге сена». Информационное графическое и соответствующее аналитическое отображение каждого решения из их возможного множества в модели и базе данных, сформированной на основе накопленного предприятиями механообработки «прошлого» опыта проектных работ, актуально и практически значимо. Графическое отображение в двумерном пространстве необходимо для организации диалога пользователей с технологией информационного логического моделирования решений задач практики на компьютере, а аналитическое в трёхмерном пространстве — на этапе автоматизированного анализа графического отображения по содержанию его информации для принятия проектного решения.

Научная новизна подхода к отображению и преобразованию возможного множества решений практики ТПП в технологических схемах для базирования объектов обоснована определением их структуры по функциям идентификации каждого решения. В основу определения структуры положено взаимодействие элементов «ведомых» и «ведущих» объектов в единой среде одного уровня структуры. Только в сопряжении объектов возможно определение методов преобразования «ведомых» объектов и соответствующих им формализованных информационных средств.

По границам сопряжения элементов в структуре объектов взаимодействия определяются новые элементы более низкого уровня структуры и соответствующие им понятия. Существование структуры обеспечивают только те исходные (ранее определённые) и полученные новые актуализированные понятия, которые могут быть определены как

формализованные, унифицированные аналоги элементов структуры и связей между элементами структуры и подлежащие встраиванию в структуру. Необходимый состав понятий, определённый в их системной информационной и логической связи, составляет основу базы знаний какой-либо предметной области. Важно, что только в условиях такого определения структуры устанавливается состав средств технологической элементной базы решения задач практики ТПП как залог достижения целей её экономической эффективности.

Множественный практический опыт автора в работе с соответствующей документацией предприятий механообработки позволяет предложить необходимые системные принципы подхода к решению сложной научно-технической задачи базирования объектов на их возможном множестве. В основу решения задачи положено определение свойств понятий, характеризующих сопряжение объектов базирования с «базирующими» объектами, и функций знаний, следующих из их формулирования.

Введём формализованные обозначения:

$\{\alpha\}$  — область исследования технологических схем для базирования объектов;

$|\dots|$  — (значение, обозначение) элемента или параметра;

$\{\dots\}$  — множество.

Сформулируем системные принципы.

1. Объекты базирования в технологических схемах их взаимодействия с «базирующими» объектами распределяем на четыре вида: {исходные заготовки, заготовки}; технологическое оснащение рабочих машин: {режущие инструменты}; приспособления для базирования {исходных заготовок, заготовок} и {режущих инструментов}.

2. «Базирующие» объекты в технологических схемах их взаимодействия с объектами базирования определяем, например, в следующем составе: рабочий орган станка для (базирования, закрепления) технологического приспособления, несущего исходную заготовку или заготовку; рабочий орган станка для (базирования, закрепления) технологического приспособления, несущего режущий инструмент; технологическое приспособление для (базирования, закрепления) исходной заготовки или заготовки; технологическое приспособление для (базирования, закрепления) режущего инструмента; (ведущий круг, шлифовальный круг, плоская коническая опора) в операциях бесцентрового шлифования; (протяжка, шаровая опора) в операциях протягивания.

Определение положения объектов {исходные заготовки, заготовки} на рабочих машинах резания далее рассматриваем как типовую основу для базирования каких-либо других объектов.

Введём актуализированные понятия.

*Объект базирования* — функциональная составная часть структуры (исходных заготовок, заготовок), определяемая как «ведомый» объект преобразования его положения на рабочих машинах.

*Ведущий объект* (базирующий) — в общем случае группа из пяти функциональных элементов, определяемая в единой среде одного уровня структуры технологических схем взаимодействия (сопряжения) с соответствующими элементами структуры «ведомого» объекта преобразования.

*Структура технологических схем базирования объектов* — состав элементов; (вид, метод наложения, функции) рабочих связей; параметры функционально различных свойств элементов структуры и связей между элементами структуры.

*Базирование* — определение положения элементов в структуре системы координат «ведомого» объекта базирования наложением связей базирования со стороны в общем случае пяти элементов структуры «ведущего» (базирующего) объекта на элементы в структуре систем координат «ведомого» объекта базирования по «опорным» точкам сопряжения объектов.

В работе [4] проведён системный анализ основных положений существующих знаний, которые изложены в ГОСТ 21495—76 «Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения» (М.: Изд-во стандартов, 1976). Впервые было обращено внимание на некорректности в суждениях, в частности, на противоречивость и логическую незавершённость понятий, на отсутствие связи понятий в систему. Первично эти замечания были обращены к основополагающему понятию «базирование» как источнику субъективного трактования и ошибок в практике применения. Анализ некорректностей существующих знаний по базированию и базам в машиностроении также приведён в цикле статей, опубликованных в журнале «Вестник машиностроения» (2005. № 6—11), под общим названием «Системные знания теории базирования в машиностроении».

*Связь базирования* — функциональная не геометрическая рабочая связь для лишения объекта базирования в каких-либо степенях

свободы его перемещений и поворотов, которая налагается по «опорным» точкам контакта сопрягаемых объектов выбранных по положению информационно и логически без наложения каких-либо сил.

*Метод базирования* — метод идентификации структуры основных базовых объектов знаний первого и второго первого типа стадии ТПП, четвёртого типа стадии КПП (см. рис. 1).

*Метод идентификации* — специализированный метод наложения связей сопряжения между объектами взаимодействия технологической схемы для определения новых элементов более низкого уровня в иерархии структуры базы знаний какой-либо предметной области по функциям общетеоретического метода синтеза структуры.

*Элементарная функция базирования* — функция лишения объекта базирования какой-либо одной степени в свободе его перемещений и поворотов по векторам  $\rho: (\perp\rho_1, \rho_1, \rho_2)$  относительно координатных плоскостей и «направляющей» оси объекта базирования.

*Координатная «направляющая» ось объекта базирования* — элемент структуры в системе координат объекта базирования, подлежащий преобразованию положения лишением его четырёх степеней свободы: (перемещения, повороты) соответственно (вдоль, вокруг) двух других осей.

*Функциональный элемент структуры объектов базирования* — элемент геометрической формы, исполняющий рабочие функции лишения объектов базирования в каких-либо степенях свободы перемещений и поворотов в пространстве системы координат объекта базирования.

*Нефункциональный элементарный простой элемент структуры объектов базирования* — элемент формы, не участвующий в сопряжении объектов базирования и «базирующего», но включаемый в состав элементов структуры какого-либо объекта базирования по двум основным причинам: для наглядности визуального графического отображения технологических схем сопряжения между элементами структуры объектов базирования и «базирующего», а также недопустимости их потери в условиях информационного логического моделирования решений задач предметной области.

3. Базирование — концептуальное понятие, обладающее инвариантными свойствами относительно какой-либо предметной области. Характеризует сопряжение элементов



структуры «ведомого» и «ведущего» объектов взаимодействия, что позволяет определить метод преобразования «ведомого» объекта и свойства сопрягаемых объектов.

В основу сопряжения положен системный принцип, определённый в работе [5]: «Наибольшую информацию о множествах несут границы их сопряжения». По границам сопряжения объектов определяются новые элементы их структуры, соответствующим им понятиям присваиваются формализованные обозначения для встраивания в структуру основных базовых объектов знаний предметной области.

4. Функции связей закрепления объекта базирования не являются рабочими, так как не определяют положение элементов в структуре системы координат объекта базирования. Методы наложения связей закрепления — фиксирование положения элементов в структуре системы координат объекта базирования. Функции связей закрепления далее не рассматриваем.

5. Структуру первого базового объекта знаний первого типа стадии ТПП (см. рис. 1) определяем в составе четырёх элементов по функциям решения четырёх основных задач базирования какого-либо объекта соответственно. Эти функции определяем идентификатором информационной и логической связи объектов базирования и «базирующего», обладающим свойствами квантора  $|\forall|$  их органического единства и общности (рис. 2).

Так как решение четырёх основных задач базирования проходит на основе наложения связей базирования со стороны элементов структуры «базирующего» объекта, то опре-

деление структуры рассматриваем в отношении преобразуемого по положению объекта — объекта базирования.

6. Определение функций в решении задач базирования какого-либо объекта определяем в структуре правой прямоугольной системы координат Декарта. В основу теоретического определения ориентации для элементов структуры системы координат положено пять принципов.

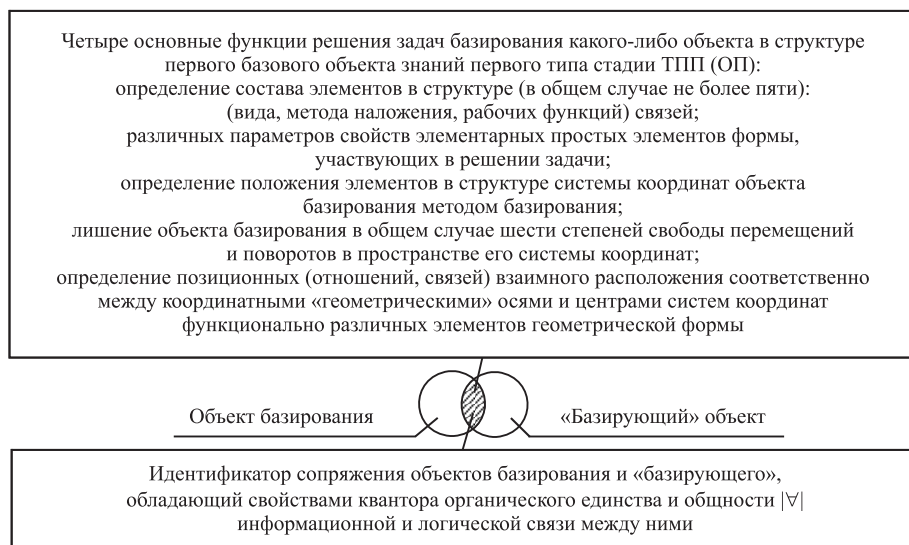
Первый принцип — решение задач базирования на их возможном множестве методами и соответствующими средствами информационной технологии необходимо в условиях, которые выбраны исходя из учета трёх объективных обстоятельств. Геометрические объекты идеальны, поэтому подлежат рассмотрению в условиях статической настройки технологических схем взаимодействия объектов.

Материальные объекты не идеальны, поэтому подлежат рассмотрению в условиях динамической настройки технологических процессов взаимодействия объектов, так как в общем случае имеют погрешности, например, в сечениях (поперечном, продольном) по параметрам (размер, форма), параметрам позиционных (отношений, связей) взаимного расположения между координатными осями элементов формы и центрами их систем координат соответственно.

Для определения положения элементов в структуре системы координат объекта базирования в условиях его сопряжения с «базирующим» объектом необходимо знать положение материальных «опорных» точек сопряжения объектов, фактическое положение которых априори

(до опыта экспериментальных измерений) неизвестно. Такое измерение в повседневной практике принятия решений чрезвычайно затруднено и нецелесообразно. Решение о положении элементов в структуре системы координат объекта базирования выбором положения «опорных» точек сопряжения объектов вынужденно принимается информационно и логически.

Второй принцип — ориентацию осей и плоскостей в системе координат объекта базирования необходимо определять на основе исполнения функций базирования «опорными» точками сопряжения



**Рис. 2. Определение квантора органического единства и общности  $|\forall|$  информационной и логической связи объектов базирования и «базирующего» объекта**

объектов, определёнными по положению информационно и логически.

Третий принцип — ориентацию элементов правой системы координат Декарта рассматриваем в связи с привычными представлениями о горизонтали, фронтоли и вертикали на основе направления воздействия силы тяжести во внутренней (своей) среде системы координат и относительно внешней среды (базирование других объектов единого назначения в сборочном узле). Внутренняя среда — привычные представления соблюдаются, внешняя среда — привычные представления не сохраняются.

Четвёртый принцип — решению задачи сопряжения объектов «базирования» и «базирующего» соответствует определение положения элементов в структуре правой прямоугольной системы координат Декарта, внутри которой ориентация координатных осей и плоскостей определена в соответствии с наименованиями и обозначениями осей  $H$ ,  $O$ ,  $P$  (рис. 3).

Пятый принцип — наименования и обозначения координатных осей поставлены в соответствие с наименованиями и обозначениями координатных плоскостей на основе понятия «плоскость параллелизма», определённого в работе [6]. «Плоскость параллелизма — плоскость, отношения взаимного расположения которой с прямой линией определяют расположением прямой линии в плоскости или параллельно ей». Понятия «плоскость параллелизма» и координатная «направляющая ось» являются основой определения положения элементов в структуре системы координат объекта базирования, а также формирования их наименований и формализованных обозначений.

7. Теоретическое определение формализованных средств отображения функций базирования возможно на основе пяти принципов.

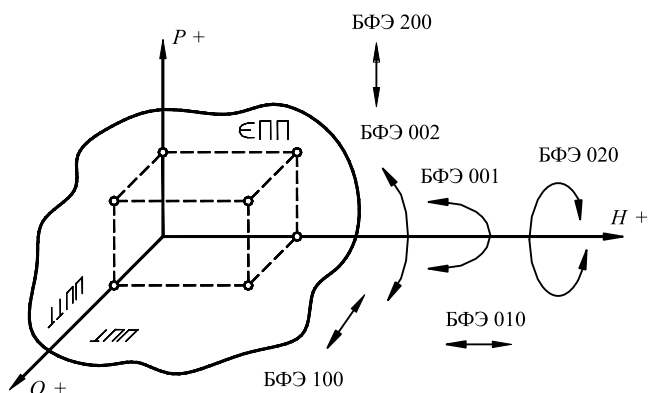


Рис. 3. Схема распределения элементарных функций базирования между элементами структуры правой прямоугольной системы координат Декарта

Первый принцип — для наглядности информационного отображения соответствия между обозначением элементов в структуре системы координат и направлением наложения связей базирования для ограничения перемещений и поворотов введём формализованные обозначения:

КСБ — система координат объекта базирования;

КСБ:  $\in$  ПП ( $H$ ,  $P$ ),  $\perp$  ПП ( $H$ ,  $O$ ),  $\perp\perp$  ПП ( $O$ ,  $P$ );

КСБЦ — центр системы координат;

$\in$  ПП ( $H$ ,  $P$ ) — направляющая плоскость;

$\perp\perp$  ПП ( $O$ ,  $P$ ) — упорная плоскость;

$O$ :  $|\perp$  ПП|  $\cap$   $|\perp\perp$  ПП| — опорная ось;

БФЭ — элементарная функция базирования;

БФС — составная функция базирования;

ПП — плоскость параллелизма;

$\perp$  ПП ( $H$ ,  $O$ ) — опорная плоскость;

$H$ :  $|\in$  ПП|  $\cap$   $|\perp$  ПП| — «направляющая» ось;

$P$ :  $|\in$  ПП|  $\cap$   $|\perp\perp$  ПП| — «упорная» ось;

$|*$  — точка положения наблюдателя;

(БФЭ, БФС) =  $|XXX|$ .

Второй принцип — каждому направлению наложения связи базирования соответствует элементарная функция базирования.

Третий принцип — трёхразрядное представление значения функции базирования принято в целях наглядности и простоты восприятия.

Четвёртый принцип — детерминированное (предопределённое) решение задачи идентификации элементов структуры в системе координат достигается методом распределения элементарных функций базирования между ними.

Пятый принцип — схема распределения элементарных функций базирования по элементам структуры системы координат приведена в соответствии с их графическим отображением.

8. Функции ограничения свободы элементов в структуре системы координат объекта базирования определяем закреплением за ними элементарных рабочих функций базирования по направлениям их исполнения элементами структуры объекта базирования в составе шести элементов. Первый элемент структуры — ограничение центра в системе координат объекта базирования в свободе его перемещений вдоль «упорной» оси (БФЭ =  $|200|$ ). Второй элемент структуры — ограничение центра в системе координат объекта базирования в свободе его перемещений вдоль «опорной» оси (БФЭ =  $|100|$ ). Третий элемент структуры — ограничение координатной «направляющей» оси в свободе



поворотов вокруг «опорной» координатной оси (БФЭ =  $|002|$ ). Четвёртый элемент структуры — ограничение координатной «направляющей» оси в свободе поворотов вокруг «упорной» координатной оси (БФЭ =  $|001|$ ). Пятый элемент структуры — ограничение системы координат объекта базирования в свободе перемещений вдоль координатной «направляющей» оси (БФЭ =  $|010|$ ). Шестой элемент структуры — ограничение системы координат объекта базирования в свободе поворотов вокруг координатной «направляющей» оси (БФЭ =  $|020|$ ).

9. На основе принятой ориентации осей и плоскостей системы координат (см. рис. 3) возникает теоретическое основание: «опорная» плоскость, «направляющая» ось, точка «направляющей» оси для идеального отображения структуры системы координат. Опорная плоскость: (БФЭ =  $|200|$ , БФЭ =  $|020|$ , БФЭ =  $|002|$ ) — лишается одного перемещения вдоль ортогональной оси  $|P|$  и двух поворотов вокруг каждой из двух взаимно ортогональных осей  $|H|$  и  $|O|$  (для этого необходимы три «опорные» точки). «Направляющая» ось: (БФЭ =  $|100|$ , БФЭ =  $|001|$ ) — лишается в «опорной» плоскости одного перемещения вдоль оси  $|O|$  и одного поворота вокруг оси  $|P|$  (для этого необходимы две «опорные» точки). Точка «направляющей» оси: БФЭ =  $|010|$  — лишается одного перемещения вдоль оси  $|H|$  (для этого необходима одна «опорная» точка). Понятие «распределение элементарных функций базирования по элементам структуры в системе координат объектов базирования («опорная» плоскость, «направляющая» ось, точка «направляющей» оси)» обладает тремя свойствами: 1) свойством квантора  $|\forall|$  органического единства и общности, отрицающим раздельное рассмотрение этих понятий; 2) свойством квантора  $|\exists|$  единственности существования

схем для сопряжения объектов базирования и «базирующего» объекта; 3) свойством информационной и логической основы определения различных (в общем случае) пяти элементов структуры объектов базирования.

Введём актуализированное понятие.

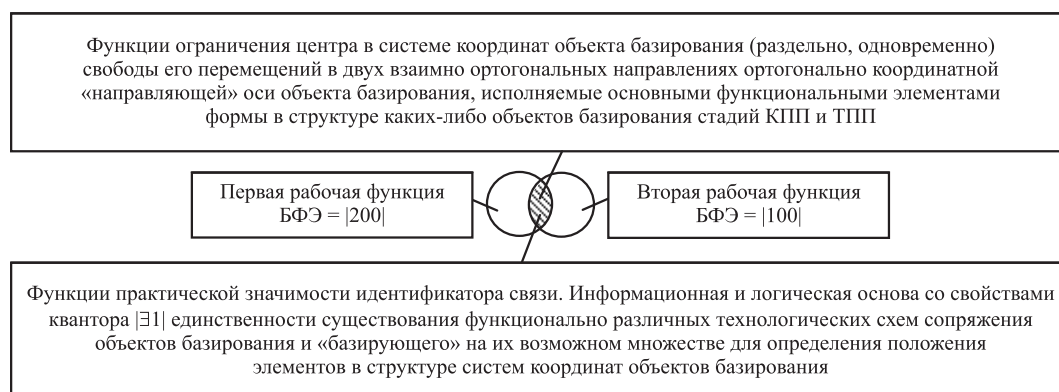
*Основной (первый) функциональный элемент геометрической формы в элементе структуры какого-либо объекта базирования* — элемент формы, исполняющий рабочие функции базирования с первой по четвёртую на альтернативной основе в четыре варианта: «одновременно» первую и вторую, «раздельно» первую или вторую, первую и третью, первую и четвёртую.

10. Первую БФЭ =  $|200|$  и вторую БФЭ =  $|100|$  рабочие функции ограничения центра в системе координат объекта базирования свободы перемещений (одновременно, раздельно) основными элементами формы определяем по функции практической значимости идентификатора их связи. Это информационная и логическая основа со свойствами квантора  $|\exists|$  единственности существования технологических схем для сопряжения объектов базирования и «базирующего» по функциям определения положения элементов в структуре систем координат объектов базирования (рис. 4).

Введём актуализированные понятия.

*Ведущая неподвижная система координат какого-либо объекта базирования* — система координат, информационно и логически связанная с основным (первым) функциональным элементом геометрической формы в структуре объекта базирования.

*Ведомые неподвижные системы координат в структуре какого-либо объекта базирования* — системы координат, в которых элементы их структуры определены в пространстве со смещением положения относительно элементов структуры для ведущей неподвижной



**Рис. 4.** Первая и вторая функции связей базирования в роли идентификатора связи для преобразования технологических схем базирования объектов на их возможном множестве

системы координат объекта базирования и связаны со вторым-пятым элементами в структуре объекта базирования.

11. Структуру смещения элементов структуры «ведомых» систем координат относительно элементов структуры «ведущей» системы координат определяем в разомкнутой цепи связей по функциям наложения (связей, отношений) взаимного расположения в информационной и логической связи с понятиями, характеризующими четыре преобразования структуры (состав связей, вид связи, функции связи, метод наложения связи).

Состав позиционных связей определяем в информационной и логической связи с составом (в общем случае) пяти различных элементов структуры, соответственно, связей на единицу меньше, но не более четырёх. Вид связи — | позиционные связи | по параметру | размерная связь |. Функции позиционных связей — определение направления наложения связей между центром «ведущей неподвижной» системы координат и центрами «неподвижных ведомых» систем координат (в общем случае) пяти функциональных элементов структуры. Метод наложения позиционных связей — проектное преобразование положения элементов структуры (в общем случае) четырёх «ведомых неподвижных» систем координат относительно элементов в структуре «ведущей неподвижной» системы координат.

Нефункциональные элементарные простые элементы формы включаем в состав функциональных элементов структуры объекта базирования наложением позиционных связей взаимного расположения между центрами их систем координат.

Отношения взаимного расположения рассматриваем для осей в распределении по функции их несомещения, например в два вида (неперпендикулярность и непараллельность): между координатной «направляющей» осью объекта базирования и «геометрическими» осями смещаемых элементов структуры объекта базирования, а также между элементарными простыми и налагаемыми на них (простыми, сложными) элементами формы в структуре составных элементов формы.

12. В общем случае пять геометрических элементов структуры объекта базирования и структура (связей, отношений) взаимного расположения между ними своё отображение в структуре объектов (исходные заготовки, заготовки) находят только как подлежащие технологическим преобразованиям в структуре

второго базового объекта знаний первого типа (см. рис. 1).

13. Решения задач базирования объектов в базе данных решений «прошлого» опыта организованы для их автоматизированного информационного поиска в составе трёх направлений: 1) распределение элементарных функций базирования между элементами формы, участвующими в решении задач базирования объектов; 2) отношения и связи взаимного расположения между «ведущей неподвижной» и «ведомыми» системами координат объектов базирования; 3) параметры проектного качества размерных и геометрических свойств (элементарных простых, составных налагаемых простых и сложных, линейчатых) элементов формы, участвующих в решении задачи базирования объектов. Указанные три направления информационного поиска как средства решения задач практики по функциям достижения экономической эффективности включены в состав технологической элементной базы интеграции информационных изделий ТПП.

14. Принципиально важно, что решение задач базирования исходных заготовок предопределяет геометрические и размерные погрешности подлежащих преобразованиям элементов формы в структуре исходных заготовок при решении задач их геометрического образования на рабочих машинах для резания. Объективно, что решение задач базирования исходных заготовок направлено на определение положения элементов в структуре систем координат объектов базирования по положению элементов в структуре систем координат «базирующих» объектов.

Исходя из этого, погрешности подлежащих преобразованиям элементов формы являются следствием перераспределения (отношений, связей) взаимного расположения между элементами формы, участвующими в решении задач базирования относительно системы координат объекта базирования преобразованной по положению. Эти погрешности первично находятся в функциональной зависимости от преобразований параметров проектного качества (отношений, связей) взаимного расположения в пространстве между «ведущей неподвижной» и «ведомыми» системами координат объектов базирования, а вторично — от преобразований параметров проектного качества (отношений, связей) взаимного расположения в пространстве между «ведущей неподвижной» системой координат объектов базирования в {рабочие машины} и «ведущей потенциально

подвижной» системой координат {рабочих машин} для формообразования резанием первого (основного) элемента формы.

Геометрические и размерные погрешности подлежащих преобразованиям элементов формы в структуре исходных заготовок являются самыми «вредоносными» источниками элементов первой группы интегральной составляющей в структуре поля допуска «межпереходных» размеров [7].

15. Существующие методики определения поля допуска «межпереходного» размера подлежащих преобразованиям элементов формы, в частности, связаны с определением «псевдопогрешностей» в решении задач базирования исходных заготовок.

В общем случае определение самой «вредоносной» составляющей в структуре поля допуска «межпереходного» размера необходимо реализовывать экспериментальными измерениями средствами специализированных интеллектуальных контрольно-измерительных систем, встраивая их в структуру рабочих машин. Наиболее актуально это для операций точения. Нормативное упорядочение этих погрешностей позволяет определить необходимую интегральную составляющую в структуре поля допуска «межпереходного» размера.

16. В основу существующих методик определения «псевдопогрешностей» «межпереходных» размеров для подлежащих преобразованиям элементов формы положены их расчёты непосредственно в технологических схемах базирования {исходных заготовок}. В этом направлении разработаны нормативные документы, однако это только частные случаи.

17. По тематике статьи автором использована работа [8] в соответствующей её части.

**Заключение.** Определение положения элементов в структуре технологических схем базирования {исходных заготовок} принципиально необходимо для разработки технологических схем базирования для подлежащих преобразованиям {элементов формы} в рабочие машины и их геометрического образования резанием на рабочих машинах. Указанные два инструментальных средства информационной технологии решения задач практики ТПП составляют основу определения двух информационных изделий, которым соответствуют реальные рабочие машины и системы рабочих машин. Информационные

изделия определяются в двух замкнутых контурах функционально различных (отношений, связей) взаимного расположения между элементами в структуре двух инструментальных средств. Контуров необходимы для расчётов достижимой проектной точности замыкающих звеньев в пределах операции и по маршруту операций. Рассматриваемые инструментальные средства и информационные изделия на их основе являются источниками определения средств технологической элементной базы для достижения экономически целесообразной эффективности информационной технологии в решении задач автоматизации высокого уровня.

#### *Библиографические ссылки*

1. Goode H.H., Machol R.E. System Engineering: An Introduction to the Design of Large-scale Systems, 1957. 551 p.
2. Гуд Г.Х., Макол Р.Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем / пер. с англ. К.Н. Трофимова, С.Е. Жорно, И.В. Соловьева; под ред. Г.И. Пивоварова. М.: Советское радио, 1962. 383 с.
3. Колыбенко Е.Н., Мордовцев А.А. Функционально различные аспекты технологии системной инженерии в познании базы знаний предметной области в примере технологической подготовки механообрабатывающего производства / Сборник науч. трудов XXIII Междунар. конф. Ч. 3. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. С. 281—293.
4. Колыбенко Е.Н. Методы и инструментальные средства отображения схем установок объектов производства в базах данных технологического назначения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ростов-н/Д.: Донской гос. техн. ун-т, 1999. 19 с.
5. Тернер Д. Вероятность, статистика и исследование операций (пер. с англ.). М.: Статистика, 1976. 431 с.
6. Фролов С.А. Начертательная геометрия. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.
7. Колыбенко Е.Н. Структура поля допуска размера по функциям определения её составляющих в конструкторской и технологической подготовке механообрабатывающего производства // Научно-технические технологии в машиностроении. 2019. № 11 (80). С. 3—9.
8. Балакшин Б.С. Основы технологии машиностроения. Изд. 3-е, доп. М.: Машиностроение, 1969. 560 с.

#### *Ссылка для цитирования*

**Колыбенко Е.Н.** Формализованные знания технологических схем базирования объектов на их множестве для автоматизированного решения задач практики в подготовке производства // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 299—307. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-299-307.

УДК 004.4`22

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-308-311

**П.С. Орлов**, д-р техн. наук, доц., **И.М. Соцкая**, канд. техн. наук, доц., **Р.Д. Адакин**  
(Ярославская государственная сельскохозяйственная академия)  
rdadakin@gmail.com

## РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОЧИСТКИ УЛЬТРАЗВУКОМ ОТЛОЖЕНИЙ С ПОВЕРХНОСТЕЙ МНОГОРАЗОВОГО ФИЛЬТРА

*Рассмотрены вопросы автоматизированного управления системой очистки масла двигателя внутреннего сгорания. За основу взят фильтр, имеющий полимерные фильтрующие элементы, очищающиеся двумя ультразвуковыми излучателями, управляемыми контролером. Разработано программное обеспечение, учитывающее нюансы работы масляного фильтра. Данный фильтр устанавливается на автомобиль на длительный срок. Замена его не требуется, необходимо лишь периодически сливать отложения из отстойника.*

**Ключевые слова:** ультразвуковой излучатель; полнопоточный фильтр; автоматизация; очистка масла; полимерный фильтрующий элемент; программное обеспечение.

*The automated control issues of the oil purification system for an internal combustion engine are considered. A filter having polymer filter elements that are cleaned by two ultrasonic emitters controlled by a controller is assumed as a basis. Software that takes into account the nuances of the oil filter is developed. This filter is installed on the car for a long time. Replacement is not required, it is only necessary to periodically drain the sediment from the sump.*

**Keywords:** ultrasonic emitter; full-flow filter; automation; oil cleaning; polymer filter element; software.

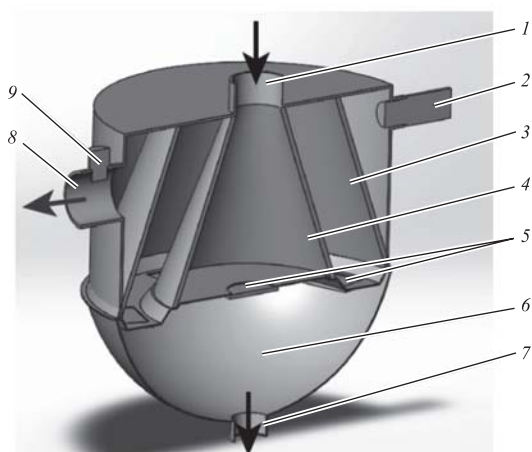
**Введение.** Надёжность и долговечность двигателей внутреннего сгорания обеспечиваются подачей чистого масла к трущимся поверхностям деталей как под давлением, так и самотёком. Твёрдые частички песка попадают через воздушный коллектор в масло, что приводит к повышенному износу двигателя. Частицы песка и металла выводятся из масла

с помощью фильтра. К сожалению, со временем фильтрующие элементы забиваются и теряют эффективность очистки масла. Поэтому их заменяют новыми. В случае использования полимерного фильтрующего элемента замена его не требуется, поскольку его поверхность очищается ультразвуком. Отложения перемещаются в нижнюю часть корпуса фильтра — отстойник. Для того чтобы синхронизировать работу исполнительных механизмов и датчиков, необходимо написать программу управления процессом очистки.

Авторами статьи разработан фильтр с полимерными покрытиями для очистки не только масел, но и любых жидкостей и нефтепродуктов [1].

Цель работы — создание системы автоматизации для очистки поверхности полимерного фильтрующего элемента масла двигателя внутреннего сгорания. Устройство фильтра приведено на рис. 1.

**Описание работы фильтра.** Масло поступает на очистку через канал 1 (см. рис. 1), попадает в расширяющуюся полость и проходит через первый фильтрующий элемент 3, затем попадает в следующую полость и проходит через второй фильтрующий элемент 4. Чистое масло выходит через канал 8. По мере загрязнения фильтрующих элементов 3 и 4 давление в кана-



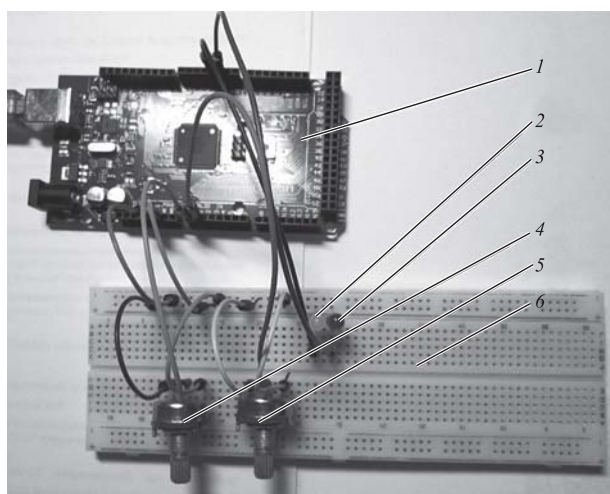
**Рис. 1.** 3D-модель фильтра:

1 — канал ввода масла; 2 — ультразвуковой излучатель; 3 — первый фильтрующий элемент; 4 — второй фильтрующий элемент; 5 — клапаны сброса загрязнений; 6 — ёмкость для хранения отложений и загрязнений; 7 — трубка вывода загрязнений; 8 — канал выхода чистого масла; 9 — датчик давления

ле 8 падает, что фиксирует датчик давления 9, включается ультразвуковой излучатель 2 и очищает поверхности фильтрующих элементов 3 и 4. Открываются клапаны 5 для сброса отложений, которые перемещаются за счёт силы тяжести в полость 6. Отложения выводятся через штуцер 7 при проведении технического обслуживания (ТО). Двигатель может некоторое время работать с отложениями, находящимися в полости 6, поскольку эта полость изолирована от полостей очистки клапанами 5.

Таким образом, фильтр работает в автоматическом режиме, периодически самоочищаясь, что позволяет работать двигателю с минимальным износом. Необходимо лишь после завершения работы двигателя долить немного масла, контролируя уровень по щупу, поскольку часть его сольётся при сливе отложений. Обращаем внимание на то, что мы не призываем продлять межсервисный интервал использования масла, а лишь предоставляем конструкцию самоочищающегося многоразового фильтра.

**Методика.** Блок-схема управления процессом очистки показана на рис. 2. Логика управления схемой состоит в следующем. На контроллер 1 записана программа на языке СИ++, в которой заложены все условия работы схемы, пороговые критерии, порядок включения и выключения ультразвукового излучателя и клапанов сброса отложений [2—4]. При забивании фильтрующих элементов повышается гидравлическое сопротивление — разность (перепад) между давлениями масла на входе и выходе из фильтра. Согласно данным НАМИ полнопоточный фильтр автомобиля «ВАЗ» имеет поры фильтрующего элемента размером 25...35 мкм,



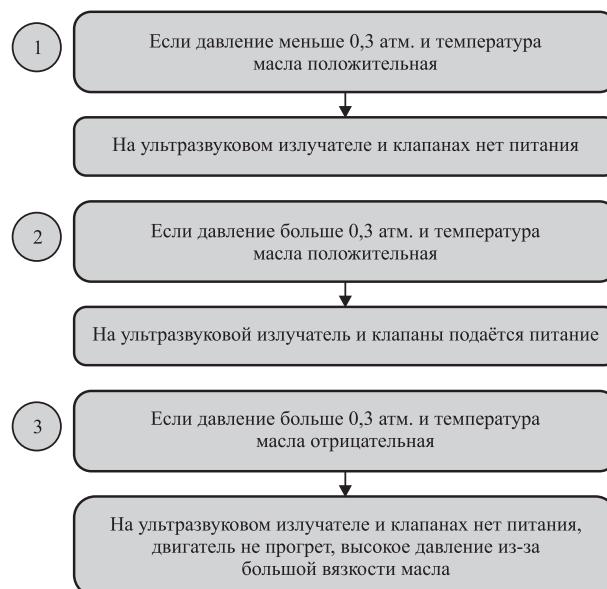
**Рис. 2. Схема управления процессом очистки фильтра:** 1 — плата контроллера; 2 — красный светодиод; 3 — синий светодиод; 4, 5 — потенциометр; 6 — макетная плата

а нормальное гидравлическое сопротивление составляет 0,3 атм. [5—7]. В данной работе за пороговое гидравлическое сопротивление примем именно значение 0,3 атм. Для этого запишем в программу управления несколько условий сравнения текущего давления с пороговым и при превышении этого значения подадим питание на ультразвуковой излучатель 2 (см. рис. 1) для начала очистки стенок фильтрующих элементов от отложений, а также откроем клапаны сброса загрязнений 5, подав на них питание.

Упростим проведение опыта, и вместо датчиков давления и ультразвукового излучателя подключим в схему потенциометры 4 и 5 (см. рис. 2). Настроив их в программе с помощью формул, будем получать значения, симулирующие температуру и давление масла. Для температуры формула преобразования будет следующей:  $\text{float temperature} = \text{sensorValue1} * (40/1023,0) - 20$ ; а для давления:  $\text{float Davlenie} = \text{sensorValue} * (0,5/1023,0)$ , где  $\text{sensorValue}$  — текущее значение сопротивления потенциометра, приходящее на контроллер. Диапазон потенциометра 0...1023 Ом. Снимаем значения температуры масла от  $-20$  до  $+20$  °С и давления масла от 0 до 0,5 атм.

При чистом фильтре, соответствующем гидравлическому сопротивлению, меньшему или равному 0,3 атм., будет гореть синий светодиод 3 (см. рис. 2), показывающий нормальную работу фильтра. При загрязнении фильтра загорается красный светодиод.

Блоки сравнения программы показаны на рис. 3.



**Рис. 3. Блоки сравнения программы**



В коде программы в комментариях встречается знак «\$», это было сделано для того чтобы вывести на график поток получаемых данных. Программа построения графика требует этих значков в начале цикла вывода значений. В данной статье этот график не рассматривается.

Видеоотчёт проведения опыта с использованием данной программы доступен по адресу,

```

Filter
1 // базовое число гидр сопротивления
2 const float baselineDavl = 0.3;
3
4 // the setup routine runs once when you press reset:
5 void setup() {
6 // initialize serial communication at 9600 bits per second:
7 Serial.begin(9600);
8 }
9
10 // the loop routine runs over and over again forever:
11 void loop() {
12 // read the input on analog pin 0:
13 int sensorValue = analogRead(A0);
14 // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a davienie:
15 float Davlenie = sensorValue * (0.5 / 1023.0);
16 // print out the value you read:
17
18 Serial.print("Гидравлическое сопротивление = ");
19 //Serial.print('$');
20 Serial.print(Davlenie);
21 Serial.println(" ATM");
22 //Serial.print(' ');
23 delay (500);
24
25 // read the input on analog pin 1:
26 int sensorValue1 = analogRead(A1);
27 // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a temperatura:
28 float temperature = sensorValue1 * (40 / 1023.0) - 20;
29
30
31 Serial.print("Температура = ");
32 Serial.print(temperature);
33 Serial.println(" C");
34 //Serial.print(' ');
35 delay (500);
36
37 // условия проверки датчиков
38
39
40 // Если давление меньше 0,3 Атм и температура положительная
41 // ультразвук и клапаны выкл.
42 if (Davlenie < baselineDavl && temperature > 0) {
43 digitalWrite(2, HIGH); //зеленая лампочка
44 digitalWrite(3, LOW); //красная лампочка
45 Serial.println("Фильтр чистый");
46 Serial.println("-----");
47 }
48
49 // Если давление больше 0,3 Атм и температура положительная
50 // ультразвук и клапаны выкл.
51 else if (Davlenie >= baselineDavl && temperature > 0) {
52 digitalWrite(2, LOW); //зеленая лампочка
53 digitalWrite(3, HIGH); //красная лампочка
54 Serial.println("Фильтр загрязнён");
55 Serial.println("Идет очистка ультразвуком");
56 Serial.println("-----");
57 delay (500);
58 Serial.println("Очистка завершена");
59
60 //for (int y = 0; y < 5; y++){
61 // Serial.println("Очистка завершена");
62 }
63
64 // Если давление больше 0,3 Атм и температура отрицательная
65 // ультразвук и клапаны выкл.
66 else if (temperature < 0) {
67 digitalWrite(2, LOW); //зеленая лампочка
68 digitalWrite(3, LOW); //красная лампочка
69 Serial.println("Густое масло");
70 Serial.println("Двигатель не пропрет");
71 Serial.println("-----");
72
73
74 }
75 delay(100);
76 }

```

Рис. 4. Код программы управления

приведённому в работе [8]. В ходе эксперимента выяснено, что данная программа корректно выполняет свои задачи. При вращении рукояток потенциометров задаются данные на контроллер давления масла и его температуры, по которым контроллер понимает, засорён фильтр или нет, и обеспечивает соответствующие воздействия на него. При проверке выполнения условий контроллером периодически подаётся питание на контакты 2 и 3, к которым подключены светодиоды, имитирующие работу ультразвукового излучателя и клапана сброса. Если светодиод светится, значит, питание на эту цепь подано, условие проверки выполнено верно.

При подключении ультразвукового излучателя и клапанов сброса необходимо подводить питание через ШИМ-драйвер, используя дополнительный источник питания. Мощности контроллера для этого не хватит.

Пример Print Scrin монитора с видеоотчётом показан на рис. 5. В углу экрана отображается запись экрана ноутбука, который соединён с контроллером шнуром USB. Было сведено два видеопотока в один.

Бегущая строка текстового сообщения о текущем состоянии работы системы — это так называемый диалог ноутбука и контроллера. На общем плане показаны проведение эксперимента, вращение ручек потенциометров, для того чтобы получать на контроллер значения давления и температуры масла. По этим значениям можно тестировать программу для всех вариантов значений и различных положений исполнительных механизмов. На бегущей строке выводятся данные о температуре масла, его давлении, уровне загрязнённости фильтра, работе ультразвукового излучателя и клапанов сброса. Светодиоды визуально сопровождают работу контроллера. Горение красного светодиода означает, что фильтр забит, синего — фильтр чистый.

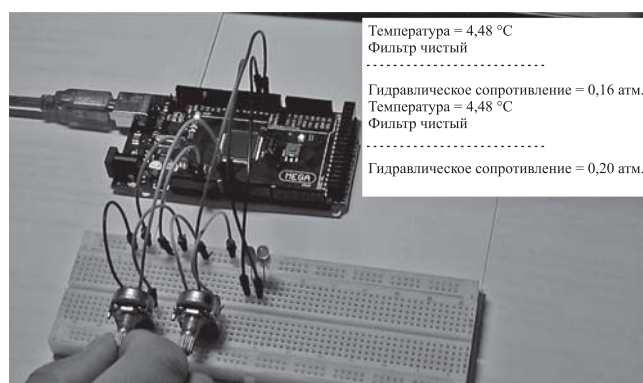


Рис. 5. Print Scrin монитора с видеоотчётом



**Выводы:**

1. Авторами разработана программа, управляющая очисткой фильтра с полимерными фильтрующими элементами.

2. В ходе эксперимента программа протестирована и показала свою работоспособность и исправность кода.

3. Для проверки подачи питания на цепи механизмов были использованы светодиоды, свечение которых показывало наличие напряжения на конкретном участке при определённом уровне засорённости фильтра.

4. Для проверки выполнения условий сравнения выводятся текстовые сообщения, принадлежащие разным циклам, на монитор ноутбука. При подаче различных значений давления и температуры масла на контроллер становится понятно, какой цикл выполняет в данный момент команды. Сравнивая эти сообщения с цифровыми данными, можно судить об адекватности работы программы.

5. Все блоки сравнения программы показали адекватную работу и верную логику выполнения операций.

**Библиографические ссылки**

1. Соцкая И.М., Орлов П.С., Казакова А.Н., Мухарьямов М.В. Фильтр для очистки жидкостей. Патент

на полезную модель России № 154484. МПК В 01Д 29/11. 2015. Бюл. № 24.

2. База знаний по системе /SCADA [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://support.simplight.ru> (дата обращения: 24.04.2019).

3. База знаний по программированию ARDUINO. URL: <https://www.arduino.cc/index.php>.

4. Соммер У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino /Freeduino СПб.: БХВ — Петербург, 2012. 238 с.

5. Курс масляных фильтров [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://abs-magazine.ru/article/kratkij-kurs-masljanyh-filtrov> (дата обращения: 24.04.2019).

6. Масляный фильтр подробно [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://wiki.zr.ru/Масляный\\_фильтр\\_подробно](http://wiki.zr.ru/Масляный_фильтр_подробно) (дата обращения: 24.04.2019).

7. ГОСТ Р ИСО 4548-1—2009. Методы испытаний полнопоточных масляных фильтров двигателей внутреннего сгорания. Ч. 1. Зависимость перепада давления от расхода. М.: Стандартинформ, 2009. 6 с.

8. Видеоотчет работы программы по очистке многократного масляного фильтра ультразвуком [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.youtube.com/watch?v=Zu\\_GjQQt7FM&t=68s](https://www.youtube.com/watch?v=Zu_GjQQt7FM&t=68s) (дата обращения: 24.04.2019).

**Ссылка для цитирования**

Орлов П.С., Соцкая И.М., Адакин Р.Д. Разработка программного обеспечения для управления процессом очистки ультразвуком отложений с поверхностей многократного фильтра // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 308—311. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-308-311.

УДК 621.373.5

М.И. Бойчук, Л.А. Васильева, С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.  
(Российский технологический университет — МИРЭА, г. Москва)  
mikaeva@npo.lit.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ НАДЁЖНОСТИ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ**

*Описана методика ускоренной оценки надёжности пьезоэлектрических резонаторов РК563 на основе вероятностно-статистического моделирования поведения частоты по времени испытаний. Метод математического моделирования основан на результатах неполных испытаний за период, составляющий 30...50 % от заданного значения минимальной наработки.*

**Ключевые слова:** надёжность; кварцевый резонатор; методика; частота; прогноз; функция.

*A methodology for an accelerated reliability evaluation of RK563 piezoelectric resonators based on probabilistic-statistical modeling of frequency behavior versus test time is described. The method of mathematical modeling is based on the results of incomplete tests for a period constituent of 30...50 % from the specified value of the minimum operating time.*

**Keywords:** reliability; quartz resonator; methodology; frequency; forecast; function.

В процессе разработки термокомпенсированного кварцевого генератора потребовалось рассчитать показатели надёжности такого

важного элемента схемы, как кварцевый резонатор, на срок безотказной работы 15 000 ч. Основным параметром, по которому можно

оценить надёжность работы кварцевого резонатора, является стабильность номинальной частота колебаний. Именно стабильность номинальной частоты резонатора легла в основу новой разработанной методики [1—3].

Методика включает правила построения вероятностно-статистической модели зависимости изменения частоты резонаторов от времени испытаний. Метод оценки показателей надёжности с применением этой модели позволяет:

оценить уход частоты на время прогнозирования;

сопоставить уходы частоты при испытаниях со значениями, заданными в нормативной документации;

оценить вероятность безотказной работы на время прогнозирования.

Метод основан на выборе прогнозирующей функции, описывающей характер изменения частоты во времени, по результатам неполных испытаний за период, составляющий 30...50 % от заданных значений минимальной наработки или сохраняемости [4].

Для построения прогнозирующей функции необходимо использовать данные измерения частоты не менее чем в четырёх точках контроля. При этом для увеличения точности прогноза рекомендуется:

выбирать точки контроля, в которых форма кривой изменения частоты перешла в точку перегиба, т. е. изменение частоты во времени в каждый последующий момент измерения носит знакопостоянный характер;

в результатах дальнейших измерений частоты в процессе испытаний проводить уточнение коэффициентов выбранной прогнозируемой функции.

По результатам измерений частоты  $f$  в каждый  $j$ -й момент времени вычисляется среднее значение ухода с помощью частоты  $\Delta f$  выражения

$$\frac{\Delta \bar{f}}{f_j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta f}{f_{ij}} \quad (1)$$

и среднее квадратичное отклонение ухода частоты от среднего значения с помощью выражения

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{N-1} + \sum_{i=1}^N \left( \frac{\Delta f}{f_{ij}} - \frac{\Delta \bar{f}}{f_j} \right)^2}, \quad (2)$$

где  $N$  — объём выборки;  $n$  — число контрольных точек измерения частоты,  $i = (1, \dots, N)$ ;  $j = (1, \dots, n)$ ;  $\frac{\Delta f}{f_{ij}}$  — значение ухода частоты  $i$ -го резонатора в  $j$ -й момент времени с учётом знака.

В качестве примера при расчёте прогнозируемой частоты использовались кварцевые резонаторы в корпусе для поверхностного монтажа размером  $5 \times 3,2 \times 1,1$  мм с полосковым кристаллическим элементом. Данный тип резонаторов был использован при разработке и изготовлении цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора, поэтому изучение поведения долговременной стабильности частоты резонаторов играло важную роль в дальнейшем исследовании поведения генераторов [5—9].

В табл. 1 приведены результаты замеров для резонаторов на частоту 12 МГц, которые прошли испытание повышенной температурой среды в течение 5000 ч.

Подставим полученные данные замеров в выражение (1), чтобы найти среднее значение ухода частоты в  $j$ -й момент времени и в выражение (2), чтобы определить среднее квадратичное отклонение уходов частоты от среднего значения в  $j$ -й момент времени. Полученные значения параметров приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

**Значения ухода частоты  $i$ -го резонатора в  $j$ -й момент времени с учётом знака  $\Delta f/f_{ij}$**

Номер изделия	Время испытаний, ч								
	0	125	250	500	1000	2000	3000	4000	5000
1	0,0	-0,2	-0,5	-1,0	-1,9	-2,3	-3,1	-3,1	-3,5
2	0,0	-0,4	-0,8	-1,0	-0,5	-1,5	-1,6	-1,8	-2,0
3	0,0	1,1	1,0	0,8	1,2	0,3	0,4	0,4	0,5
4	0,0	-2,2	-4,1	-5,1	-5,0	-5,6	-5,8	-5,6	-5,8
5	0,0	0,3	-0,1	-0,8	-0,6	-1,8	-2,1	-2,5	-2,9
6	0,0	-0,1	-0,5	-0,7	-1,0	-1,3	-1,5	-1,8	-1,9
7	0,0	-1,5	-1,9	-2,2	-2,4	-2,9	-3,1	-3,0	-3,9
8	0,0	-0,4	-0,9	-1,3	-2,1	-3,5	-5,4	-5,3	-5,4
9	0,0	-0,9	-2,2	-3,6	-3,0	-5,8	-6,3	-6,3	-6,5
10	0,0	0,4	0,0	-0,3	-2,2	-2,6	-2,5	-2,7	-3,3
11	0,0	-0,6	-1,6	-2,9	-4,8	-5,3	-5,9	-5,8	-6,2
12	0,0	0,2	-1,5	-0,7	-1,8	-2,4	-3,0	-3,2	-3,6
13	0,0	0,4	0,0	-0,4	-0,9	-4,3	-2,0	-1,9	-2,6
14	0,0	-0,1	-1,4	-2,9	-4,8	-5,7	-6,3	-6,9	-6,7
15	0,0	-0,8	-1,5	-2,3	-2,6	-3,1	-3,5	-3,3	-3,7
16	0,0	-1,1	-1,2	-1,9	-3,6	-5,1	-6,1	-6,4	-6,6
17	0,0	-0,6	-0,9	-1,7	-2,4	-3,7	-4,0	-6,1	-4,7
18	0,0	0,0	-0,4	-1,0	-1,0	-1,7	-1,6	-1,5	-3,5
19	0,0	-0,4	-1,2	-1,9	-2,4	-3,5	-3,7	-4,4	-4,4
20	0,0	0,3	0,5	-0,4	-1,1	-2,3	-2,9	-3,7	-4,2

Таблица 2

**Среднее значение и среднее квадратичное отклонение ухода частоты от среднего значения в  $j$ -й момент времени**

Параметр	Время испытаний, ч								
	0	125	250	500	1000	2000	3000	4000	5000
$\Delta\bar{f}/f_j$	0,0	-0,3	-0,96	-1,6	-2,14	-3,2	-3,5	-3,75	-4,0
$S_j$	0,0	0,7	1,1	1,3	1,6	1,7	1,9	2,0	1,8

Модель зависимости изменения частоты от времени испытания можно представить линейной:

$$\frac{\Delta\bar{f}}{f} = b_0 + b_1 t \quad (3)$$

или логарифмической:

$$\frac{\Delta\bar{f}}{f} = d_1 \ln\left(1 + \frac{t}{t_0}\right), \quad (4)$$

где  $b_0, b_1, d_1, t_0$  — коэффициенты;  $t$  — время испытаний.

При этом будем считать, что распределение уходов частоты в фиксированных временных сечениях подчиняется нормальному закону.

С помощью выражений (3, 4) находим функцию, которая наилучшим образом описывает изменения ухода частоты в течение времени неполных испытаний.

Сначала определяем коэффициенты  $b_0$  и  $b_1$ , входящих в выражение (3):

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{\Delta\bar{f}}{f_j} \sum_{j=1}^n t_j^2 - \sum_{j=1}^n t_j \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\bar{f}}{f_j} t_j}{n \sum_{j=1}^n t_j^2 - \left(\sum_{j=1}^n t_j\right)^2}; \quad (5)$$

$$b_0 = \frac{-19,45 \cdot 55\,328\,125 + 15\,875 \cdot 55\,091}{9 \cdot 55\,328\,125 - 252\,015\,625} = -0,82;$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\bar{f}}{f_j} t_j - \sum_{j=1}^n t_j \sum_{j=1}^n \frac{\Delta\bar{f}}{f_j}}{n \sum_{j=1}^n t_j^2 - \left(\sum_{j=1}^n t_j\right)^2}; \quad (6)$$

$$b_1 = \frac{9 \cdot 55\,091 + 15\,875 \cdot 19,45}{9 \cdot 55\,328\,125 - 252\,015\,625} = 0,003.$$

Для нахождения коэффициентов  $d_1$  и  $t_0$ , входящих в выражение (4), по результатам

неполных испытаний выбирают два средних ухода частоты  $\frac{\Delta\bar{f}}{f_k}$  и  $\frac{\Delta\bar{f}}{f_g}$  таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$\frac{\Delta\bar{f}/f_k}{\Delta\bar{f}/f_g} \approx 2.$$

Для имеющихся кварцевых резонаторов выбираем время достижения средних уходов  $\Delta\bar{f}/f_k$  и  $\Delta\bar{f}/f_g$ ,  $t_k = 1000$  и  $t_g = 5000$ , так как отношение средних уходов частоты между этими величинами составит

$$\frac{\Delta\bar{f}/f_k}{\Delta\bar{f}/f_g} = \frac{-4,0}{-2,14} = 1,87.$$

В случае если это соотношение по результатам неполных испытаний не выбирается, то методом линейной интерполяции на основе измеренных значений уходов частоты устанавливают время наступления такого среднего ухода частоты, чтобы выполнить данное соотношение. Далее определяем значения коэффициентов  $t_0$  и  $d_1$  по следующим выражениям:

$$t_0 = \frac{t_g^2}{t_k - 2t_g}; \quad (7)$$

$$t_0 = \frac{1000^2}{5000 - 2 \cdot 1000} = 333,3;$$

$$d_1 = \frac{\frac{\Delta\bar{f}}{f_k}}{\ln\left(1 + \frac{t_k}{t_0}\right)} \text{ или } d_1 = \frac{\frac{\Delta\bar{f}}{f_g}}{\ln\left(1 + \frac{t_g}{t_0}\right)}; \quad (8)$$

$$d_1 = \frac{-4,0}{\ln\left(1 + \frac{5000}{333,3}\right)} = \frac{-4,0}{2,77} = -1,44.$$

Для определения функции, которая наилучшим образом описывает изменения уходов частоты во времени, необходимо составить табл. 3, содержащую значения квадратов отклонений между истинными (измеренными) величинами уходов частоты  $\frac{\Delta\bar{f}}{f_j}$  и полученными расчётом с помощью аппроксимации функций из выражений (1), (2)  $\frac{\Delta\bar{f}}{f_{jp}}$  в каждый момент  $t_j$  неполных испытаний.

В качестве прогнозирующей функции выбирают функцию, которая имеет наименьшее значение суммы квадратов отклонений. В нашем случае очевидно, что поведение кварце-

Таблица 3

**Значения квадратов отклонений между измеренными и расчётными значениями относительных уходов частоты**  $\left[ \frac{\Delta \bar{f}}{f_j} - \frac{\Delta \bar{f}}{f_{jp}} \right]^2$

Вид прогнозирующей функции	Время испытаний, ч									
	0	125	250	500	1000	2000	3000	4000	5000	$\sum \left[ \frac{\Delta \bar{f}}{f_j} - \frac{\Delta \bar{f}}{f_{jp}} \right]^2$
$b_0 + b_1 t$	0	0,02	0,79	5,20	18,66	70,2	136,4	222,9	330,5	784,7
$d_1 \ln(1 + t/t_0)$	0	0,03	0,03	0,08	0,02	0,16	0,04	0,003	0,0001	0,363

вых резонаторов при долговременной нестабильности лучше всего описываются логарифмической функцией, при которой

$$\sum \left[ \frac{\Delta \bar{f}}{f_j} - \frac{\Delta \bar{f}}{f_{jp}} \right]^2 = 0,363.$$

Оценку среднего значения ухода частоты проводят путём подстановки в прогнозирующую функцию, выбранную согласно табл. 2 и 3, значения времени прогноза  $t_{пр}$ .

Согласно техническим требованиям к цифровому термокомпенсированному кварцевому генератору срок его безотказной работы должен составлять 15 000 ч. Именно эту величину мы выбираем в качестве  $t_{пр}$ , так как долговременная нестабильность частоты резонатора является основным фактором, влияющим на выходные характеристики разработанного цифрового термокомпенсированного кварцевого генератора. Таким образом,

$$\frac{\Delta \bar{f}}{f_{пр}} = d_1 \ln \left( 1 + \frac{t_{пр}}{t_0} \right) = -1,44 \cdot \ln \left( 1 + \frac{15\,000}{333,3} \right) = -5,5.$$

Для стандартного отклонения  $S_{пр}$  за время прогноза  $t_{пр}$  находим значение коэффициента вариации по результатам неполных испытаний:

$$v = \frac{S_{\max}}{\frac{\Delta \bar{f}}{f_{пр}}}, \quad (9)$$

где  $S_{\max}$  — максимальное среднее квадратическое значение стандартного отклонения уходов частоты за время неполных испытаний;  $\frac{\Delta \bar{f}}{f}$  — соответствующее  $S_{\max}$  значение ухода частоты,

$$v = \frac{2,0}{-5,5} = -0,36.$$

Величину  $S_{пр}$  находят с помощью выражения

$$S_{пр} = v \frac{\Delta \bar{f}}{f_{пр}}; \quad (10)$$

$$S_{пр} = -0,36(-5,5) = 1,98.$$

В случае линейной зависимости величину  $S_{пр}$  находят с помощью выражения (3) по формуле

$$S = b_2 + b_3 t. \quad (11)$$

Коэффициенты  $b_2$  и  $b_3$  определяются выражениями (5) и (6) соответственно, в которых величину  $\frac{\Delta \bar{f}}{f}$  заменяют на  $S$ .

Оценка максимальных уходов частоты на время прогноза выполняется с помощью выражения

$$\frac{\Delta f}{f_{\max}} = \frac{\Delta \bar{f}}{f_{пр}} \pm K_1 S_{пр}. \quad (12)$$

В формуле (12)  $K_1$  — коэффициент для определения двусторонней толерантности границ. Его значения приведены в работе [4] (при коэффициентах  $\rho = 0,95$ ;  $\gamma = 0,9$ ). В нашем случае  $K_1 = 2,564$ , откуда  $\frac{\Delta f}{f_{\max}} = -5,50 \pm 2,564 \cdot 1,98$ , т. е. лежит в диапазоне от  $-10,58$  до  $0,42$ .

Таким образом, прогнозируемые максимальные уходы частоты резонаторов за период 15 000 ч составят  $+0,42$  и  $-10,58$ .

Вероятность безотказной работы или безотказного хранения  $p(t)$  на время прогноза  $t_{пр}$  определяется выражением

$$p(t) = \Phi \left( \frac{\frac{\Delta \bar{f}}{f_{кр}} + \frac{\Delta \bar{f}}{f_{пр}}}{S_{пр}} \right), \quad (13)$$

где  $f_{кр}$  — частота отказа резонаторов;  $\Phi$  — функция Лапласа.

При прогнозировании минимальной нагрузки  $t_n$  в качестве её оценки принимаем момент времени, при котором прогнозируемое значение вероятности безотказной работы  $p(t_n) = 0,99$ .

#### Библиографические ссылки

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. С. 150.
2. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. С. 135.
3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. С. 186.
4. **ОСТ В II 070.059—79.** Изделия электронной техники. Методы установления норм на электрические параметры.
5. **Бойчук М.И.** Влияние креплений на температурно-частотную характеристику резонаторов // Компоненты и технологии. 2011. № 9. С. 188—190.

6. **Бойчук М.И., Микаева С.А.** Сборка кварцевых генераторов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 10. С. 7—11.

7. **Бойчук М.И., Микаева А.С., Микаева С.А.** Температурно-частотные характеристики резонаторов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 8. С. 343—348.

8. **Бойчук М.И., Микаева С.А.** Проведение испытаний и контроль электронной компонентной техники / Российская научно-техническая конференция с международным участием. Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике: сб. докл. конф. 2019. С. 258—261.

9. **Бойчук М.И., Власов К.В., Черпухина Г.Н., Демин С.А., Южалкин А.С., Глазунова Ю.А.** Способ изготовления тонких кристаллических пластин и тонких кристаллических элементов // Патент России № 27122426. 2020. Бюл. № 3.

#### Ссылка для цитирования

**Бойчук М.И., Васильева Л.А., Микаева С.А.** Математический расчёт надёжности кварцевых резонаторов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 311—315.

УДК 528.8:631.4

**Н.Г. Джавадов**, д-р техн. наук, проф., **Ф.Т. Казимова**  
(Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика)  
javadov.n.h@mail.ru; fergane.kazimova@mail.ru

### ИНФОРМАЦИОННАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОЧВЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В НЕЙ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

*Статья посвящена информационной оценке результатов дистанционного зондирования почвы при изучении двумерного распределения органических веществ. Сформулирована задача такой оценки. Показан экстремальный характер сформулированной задачи. Её решение методом вариационной оптимизации позволило выявить оптимальное соотношение между основными показателями процедуры измерения содержания органических веществ в почве. Проведено сравнение полученных теоретических результатов с результатами известных экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование; информативность; оптимизация; органические вещества; почва.

*The article is devoted to an informational evaluation of the soil remote sounding results when studying the two-dimensional distribution of organic substances. The problem of such evaluation is formulated. The extreme nature of the formulated problem is shown. Its solution by the method of variation optimization made it possible to identify the optimal ratio between the main indicators of the procedure for measuring the content of organic substances in the soil. The comparison of the obtained theoretical results with the results of known experimental studies is carried out.*

**Keywords:** remote sounding; informational content; optimization; organic matter; soil.

**Введение.** Органические вещества являются важной составной частью почвы и одним из важных индикаторов уровня её плодородности. При этом они составляют не более

10 % почвы. По этой причине важно обеспечить высокую точность оценки содержания органических веществ в почве, и исследования в данном направлении являются актуальными.

ми [1]. Следует отметить, что вопрос о точном определении суммарного количества органических веществ в почве, распределённых по площади неоднородного поля, тесно связан с распределением органических веществ в почве на различных локально однородных участках этого поля. Данное обстоятельство обуславливает необходимость оптимизации измерительных процедур определения такого распределения. Как показано в работе [2], весьма распространённый показатель состояния развития растительности — нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI) имеет достаточно высокую степень корреляции с содержанием органических веществ в почве. Однако неоднозначность результатов определения NDVI различными средствами, а также такое явление, как распределение NDVI по полю, не позволяют использовать отмеченный факт для определения информативности результатов экспериментального исследования распределения по площади поля органических веществ в почве.

Согласно работе [3] органический состав почвы может быть определён по характеристикам её отражательного спектра. В этой работе определено наличие некоторых спектральных участков, где органический состав почвы коррелирует с определённой длиной волны отражённого сигнала. Данный факт позволяет определить органический состав почвы с помощью многофакторного регрессионного уравнения, где переменными являются коэффициенты отражения на пяти длинах волны. Вместе с тем неоднозначность привязки спектральных показателей к геометрическим показателям почвы не позволяет использовать спектральные характеристики отражения почвы для информационной оценки двумерного распределения органических веществ в почве.

Согласно работе [4] почвы с высоким содержанием органических веществ характеризуются тёмным цветом. Существует цветовая классификация Манселла, определяющая связь между содержанием органических веществ в почве и её цветом. Исследования, представленные в работе [4], проводились в следующих двух направлениях:

1. Определение зависимости общего количества органического углерода (углерод, входящий в состав органических веществ атмосферы, гидросферы и горных пород) от интенсивности отражённого от почвы оптического сигнала в R (красном), G (зелёном), B (синем) диапазонах. Было определено, что указанная

Таблица 1

### Классификация содержания органического углерода в почве

Класс	Содержание органического углерода в почве, %
1	>1,84
2	1,40...1,84
3	1,06...1,40
4	0,83...1,06
5	0,67...0,83
6	0,56...0,67
7	0,37...0,56
8	<0,37

зависимость имеет почти экспоненциально убывающий характер.

2. Исследование распределения по площади поля содержания органического углерода в почве. В работе [4] было предложено условно разделить процентное содержание органического углерода в почве на восемь классов (табл. 1). Видно, что с увеличением номера класса растёт содержание органического углерода в почве. Гистограмма распределения по площади поля указанных классов приведена на рис. 1.

Классификация проводилась двумя методами. В первом методе концентрация органического углерода в каждом пикселе вычислялась отдельно для предварительно выделенных субпикселей, соответствующих восьми классам. Далее проводилось средневзвешенная концентрация органического углерода по пикселю. Результаты такой классификации на

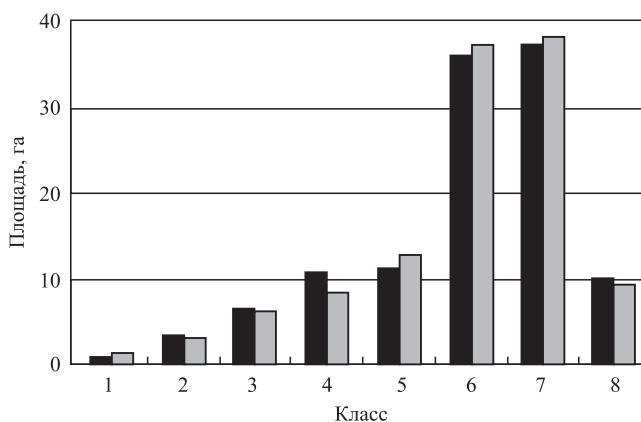


Рис. 1. Распределение площадей исследованных участков по классам содержания органического углерода в почве [4]



рис. 1 отображены чёрным цветом. Во втором методе сначала изображение классифицировалось по 20 кластерным группам, в каждой кластерной группе вычислялась концентрация органического углерода, потом эти кластерные группы вновь группировались по восьми классам. Результаты такой классификации отображены на рис. 1 серым цветом.

**Постановка задачи исследования.** Для планирования работ по дистанционному зондированию почвы необходимо исследовать потенциальную информативность состояния почвы, используя методы контактных измерений. Согласно работе [5] пространственное распределение органических веществ в почве может быть исследовано с помощью сети контактных измерителей, распределённых по полю. Такие микромеханические измерители работают достаточно эффективно, и их результирующая погрешность резко убывает с увеличением числа таких измерителей в группе. Вопрос об экспериментальном определении пространственного распределения органических веществ в почве на неоднородном двумерном пространстве наиболее подробно рассмотрен в работе [6]. Как отмечается в этой работе, географическое направление или ориентация (аспект) полей, размещённых на склонах гор, является фактором, обуславливающим распределение по их площади органических веществ в почве. Физически это проявляется в том, что склоны, направленные в стороны севера и востока, обычно имеют более низкую температуру, более высокую влажность и способны аккумулировать большее количество органических веществ. На рис. 2 приведена гистограмма содержания органических веществ в почве в зависимости от географической ориентации поля.

На рис. 2 показаны шесть градаций содержания органических веществ для восьми географических ориентаций исследуемых участков (пикселей). По оси ординат отложено число пикселей с соответствующим содержанием органических веществ, наблюдаемых на экране системы дистанционного зондирования.

Из приведённой гистограммы следует, что на участках, расположенных на склонах, направленных на север, доминирует высокое со-

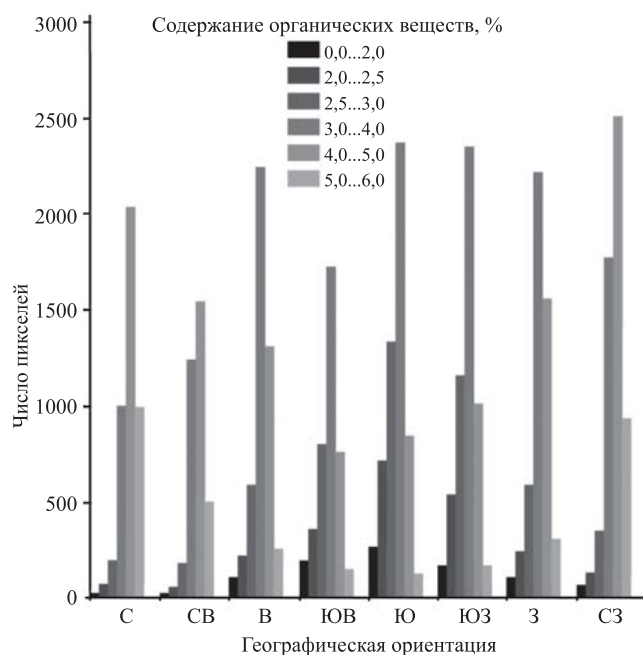


Рис. 2. Распределение содержания органических веществ в почве на шести дискретных уровнях в зависимости от географической ориентации поля [6]

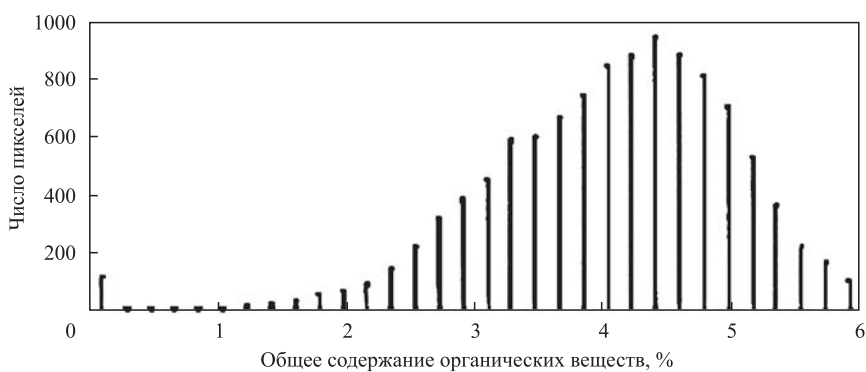


Рис. 3. Распределение содержания органических веществ в почве с высоким содержанием железа [6]

держание органических веществ, в то время как на участках, расположенных на склонах, направленных на юг, доминирует низкое содержание органических веществ. Согласно работе [6] распределение органических веществ в почве также зависит от содержания в ней железа (рис. 3). Так, в почве с высоким содержанием железа доминирует высокое содержание органических веществ (рис. 3, а), а в почве с низким содержанием железа — низкие содержания органических веществ (рис. 3, б).

По оси ординат отложено число пикселей (т. е. наименьших земельных участков, воспроизводимых системой формирования изображений).

Целью представленного в настоящей статье исследования является оптимизация измерительного процесса, реализуемого методами дистанционного зондирования. Ставится задача обеспечения оптимального выбора режимных параметров зондирования для получения максимального содержания информации в бортовых данных. Для её решения будет использоваться методология информационной оптимизации, ранее применённая в работе [7] для решения качественно другой задачи.

**Предлагаемое решение.** Допустим, что в результате исследования множества полей, имеющих различную географическую ориентацию, обнаружено, что число пикселей на экране дистанционной изображающей системы, способных принять любую из градационных уровней концентрации органических веществ исключительно в интервале  $1...i$ , равно  $N_i$ ;  $i = \overline{1, n}$ .

Допустим, что имеем  $i$ -й идентификатор, идентифицирующий пиксели с максимальным уровнем  $m_i$ , способных принять градационный уровень яркости отражённого сигнала, в интервале  $1...m_i$ .

Если считать каждый из  $n$  идентификаторов элементом сообщения, то на выходе  $i$ -го идентификатора будет сформирована последовательность из  $N_i$  чисел пикселей сенсора. В этом случае количество информации, формируемой на выходе  $i$ -го идентификатора, определим как

$$M_i = \log_2 N_i^{m_i} = m_i \log_2 N_i. \quad (1)$$

Суммируя (1) по всем  $i$ , получим выражение для суммарного количества информации на выходе всех идентификаторов:

$$M_\Sigma = \sum_{i=1}^n m_i \log_2 N_i. \quad (2)$$

Введём функцию

$$N_i = N(m_i). \quad (3)$$

Она определяет число пикселей на экране сенсора, которые могли бы иметь все уровни градаций концентрации органического вещества только в интервале  $0...m_i$ .

Суммируя (3) по всем  $i$ , получим

$$\sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n N(m_i). \quad (4)$$

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^n N_i = \sum_{i=1}^n N(m_i) = C, \quad (5)$$

где  $C = \text{const}$ .

Таким образом, имеем дискретную информационную модель процесса измерения содержания органических веществ в почве, состоящую из выражений (2), (3), (5).

Для оптимизации процесса измерения осуществляется условный переход на эквивалентную непрерывную модель процесса. Такой переход вполне обоснован, так как функционал цели по сути является определённым интегралом. Если учесть, что в геометрическом смысле определённый интеграл является площадью, находящейся под интегрируемой функцией (интегрантом), то замена непрерывного интегранта его кусочно-дискретной аппроксимацией в принципе не изменяет результат суммирования, за исключением появления некоторой погрешности аппроксимации. В непрерывной модели выражения (2), (3) и (5) приобретают следующий вид:

$$M = \int_0^{m_{\max}} m \log_2 N(m) dm; \quad (6)$$

$$N_{m_{\max}} = N(m); \quad (7)$$

$$\int_0^{m_{\max}} N(m) dm = C; C = \text{const}. \quad (8)$$

С учётом выражений (6) и (8) составим целевой функционал безусловной вариационной оптимизации  $F$ :

$$F = \int_0^{m_{\max}} m \log_2 N(m) dm + \lambda \left[ \int_0^{m_{\max}} N(m) dm - C \right], \quad (9)$$

где  $\lambda$  — множитель Лагранжа.

Согласно уравнению Эйлера—Лагранжа [7, 8] оптимальная функция  $N(m)_{\text{опт}}$ , приводящая  $F$  к экстремальному значению, определяется по условию

$$\frac{d\{m \log_2 N(m) + \lambda[N(m) - C]\}}{dN(m)} = 0. \quad (10)$$

Решение оптимизационной задачи с учётом выражений (8) и (10) получено в виде

$$N(m) = \frac{2Cm}{m_{\text{max}}^2}. \quad (11)$$

Таким образом, при условии (11) целевой функционал (9) достигает своего экстремума.

**Обсуждение результатов.** Как указано в работе [7], целевой функционал имеет экстремум в виде максимума в том случае, когда вторая производная интегранта функционала цели по искомой функции имеет отрицательный знак. Проведённый анализ показал, что целевой функционал (9) при решении (11) удовлетворяет этому требованию, т. е. вторая производная его интегранта по искомой функции имеет отрицательное значение. Так как физический смысл функционала цели (9) заключается в количестве информации, добываемой в результате проводимых измерений, то измерения по определению распределения органических веществ в почве по полю по условию (11) являются более информативными при наличии прямо пропорциональной связи между показателями  $N$  и  $m$ . В этом смысле, если сравнить данные, приведённые на рис. 3, *a* и 3, *б*, то более информативными следует считать данные, приведённые на рис. 3, *a*, так как здесь интервал оси абсцисс, где наблюдается линейная взаимосвязь между  $N$  и  $m$  типа (11), более широкий и равен 0...4,4, в то время как на рис. 3, *б* этот интервал равен 0...3,2.

**Заключение.** Суммируя изложенное выше, сделаем следующие основные выводы:

1. Сформулирована задача информационной оценки результатов дистанционного зондирования почвы в целях определения распределения в ней органических веществ по площади поля.

2. Показан экстремальный характер сформулированной задачи. Её решение методом вариационной оптимизации позволило выявить оптимальное соотношение между основ-

ными показателями процедуры измерений, каковыми являются число градаций концентрации органического вещества и число пикселей, обладающих такой концентрацией.

3. Осуществлено сравнение полученных теоретических результатов с результатами известных экспериментальных исследований и сделан вывод о том, что при исследовании распределения по площади поля органических веществ в почве с высоким содержанием железа потенциально можно получить больше информации, чем при исследовании такого распределения в почве с низким содержанием железа.

#### Библиографические ссылки

1. Xie R., Xiao H. Application of Remote Sensing in the Estimation of Soil Organic Matter Content // The Italian Association of Chemical Engineering. 2018. Vol. 66. P. 469—474.
2. Burnham J.H., Sletten R.S. Spatial distribution of soil organic carbon in northwest Greenland and underestimates of high Arctic carbon stores // Global Biogeochemical cycles. 2010. Vol. 24. <https://doi.org/10.1029/2009GB003660>.
3. Yu S., Yao Y., Wang D., Si H. Studies on Soil Organic Matter Content Mapping Using EO-1 Hyperion Data / Proceeding of Second Intern. Conf. Agro-Geoinformatics, 2013. DOI:10.1109/Argo-Geoinformatics.2013.6621959.
4. Chen F., Kissel D.E., West L.T., Adkins W. Field-Scale Mapping of Surface Soil Organic Carbon Using Remotely Sensed Imagery // Soil Science Society of America J. 2000. Vol. 64(2). P. 746—753.
5. Nguyen L., Kodagoda S. Soil Organic Matter Estimation in Precision Agriculture using Wireless Sensor Networks // IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. November 2016. DOI: 10.1109/ICARCV.2016.7838635.
6. Palacios-Orueta A., Pinzo'n E.J., Ustin L.S., Robert D.A. Remote Sensing of Soils in the Santa Monica Mountains: II. Hierarchical Foreground and Background Analysis. Remote Sensing of Environment. 1999. Vol. 68. Iss. 2. P. 138—151.
7. Асадов Х.Г. Принцип уменьшения размерности для синтеза и оптимизации подкласса информационно-измерительных систем с затухающими сигналами и для планирования эксперимента // Информационные технологии. 2003. № 7. С. 58—63.
8. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

#### Ссылка для цитирования

Джавадов Н.Г., Казымова Ф.Т. Информационная оценка результатов дистанционного зондирования почвы при изучении распределения в ней органических веществ // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 315—319.

#### Уважаемые читатели!

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



Ф.С. Чьонг

(Ханойский государственный технический университет им. Ле Куи Дона, Вьетнам)

truongpx@mta.edu.vn

## СПОСОБ КОРРЕКЦИИ АСТРОИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

*Исследована задача повышения точности навигационного комплекса беспилотного летательного аппарата алгоритмическим путём. Рассмотрены схемы алгоритмической коррекции навигационных систем современных высокоточных беспилотных летательных аппаратов. Предложен способ компенсации погрешностей инерциальной навигационной системы, корректируемой сигналами астросистемы. Коррекция осуществляется в структуре инерциальной навигационной системы с помощью нелинейного фильтра Калмана и алгоритма управления. Использован нелинейный алгоритм управления, основанный на методе SDC-представления.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат; инерциальная навигационная система; астросистема; навигационный комплекс; нелинейный фильтр Калмана; модель ошибок; регулятор; SDC-метод.

*The accuracy increasing problem of the unmanned aerial vehicle navigation complex in an algorithmic way is investigated. The algorithmic correction schemes of navigation systems for modern high-precision unmanned aerial vehicles are considered. The error compensating method of the inertial navigation system corrected by astro-system signals is proposed. Correction is carried out in the structure of the inertial navigation system using a non-linear Kalman filter and a control algorithm. A nonlinear control algorithm based on the SDC representation method is used.*

**Keywords:** unmanned aerial vehicle; inertial navigation system; astro-system; navigation complex; non-linear Kalman filter; error model; regulator; SDC method.

**Введение.** Современные высокоточные беспилотные летательные аппараты (БЛА) оснащаются навигационными системами и комплексами, имеющими максимально возможные точности. Точностные требования, предъявляемые к навигационным системам БЛА, неуклонно возрастают. Поэтому для достижения максимально возможной точности навигационных определений БЛА навигационные системы объединяют в комплексы (НК) и подвергают их измерения совместной обработке [1–3].

Измерительные сигналы систем в составе НК имеют погрешности, обусловленные конструктивными особенностями и условиями функционирования БЛА. Повышение точности НК предполагает компенсацию погрешностей алгоритмическим путём.

Рассматриваемый БЛА снабжён инерциальной навигационной системой (ИНС), приёмником спутниковой навигационной системы (СНС) и астронавигационной системой (АНС), установленной на гиросtabilizированной платформе (ГСП). Системы НК имеют специфические негативные особенности. По-

грешности автономной ИНС накапливаются с течением времени. В условиях активных помех применять СНС не всегда возможно [3]. АНС подвержены влиянию пассивных помех [4–6], поэтому проводится комплексная алгоритмическая обработка сигналов от этих трёх систем. Обычно используются схемы коррекции НК в выходном сигнале [7, 9–11]. При этом погрешности ИНС нарастают со временем и при длительном полёте БЛА модель погрешностей, используемая в НФК, становится неадекватной реальному процессу [3].

В статье предложена схема коррекции НК с использованием нелинейного фильтра Калмана (НФК) и нелинейного регулятора, которая позволяет компенсировать погрешности ИНС в структуре системы. Такая коррекция предотвращает нарастание погрешностей ИНС с течением времени и сохраняет адекватность принятой в НФК модели.

Перспективы дальнейших исследований связаны с поиском более универсальных методов представления нелинейных моделей, чем SDC-метод.

**Астросистемы.** ИНС и СНС достаточно подробно исследованы [3, 4], а АНС мало освещены в современной литературе [6]. Первые применения АНС связаны с наведением снарядов [4]. Простейшая АНС наведения представлена рис. 1. В качестве чувствительных элементов таких АНС использованы телескопы, направленные на заранее выбранные небесные тела. Путём определения положения небесных тел устанавливаются пространственные координаты снаряда, используемые для наведения снаряда. Обычно применяется несколько телескопов с направлением на фиксированные звёзды, которых должно быть по крайней мере две.

Системы следящих телескопов весьма громоздки, поэтому их применение ограничивалось большими снарядами.

Следующим этапом совершенствования АНС является устройство, состоящее из инерционной системы, непрерывно корректируемое на определённых интервалах. Рассмотрим инерционный автоматический ориентатор с астрокоррекцией (ИАОАК) и автоматическую астронавигацию (АА).

В ИАОАК проводится периодическое измерение положения звёзд для коррекции дрейфа гироскопов. Один из возможных методов исключения ошибки, вызванной случайным дрейфом, заключается в использовании звёзд. На платформе дополнительно устанавливается автоматический секстант таким образом, чтобы он мог изменять угол возвышения и азимут.

Двигатели для изменения углов азимута и возвышения являются прецизионными датчиками момента, которые связаны с системой, определяющей положение секстанта. Систе-

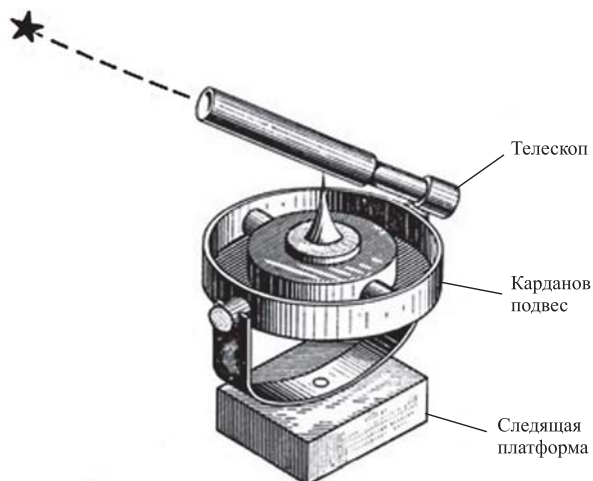


Рис. 1. Следящий телескоп

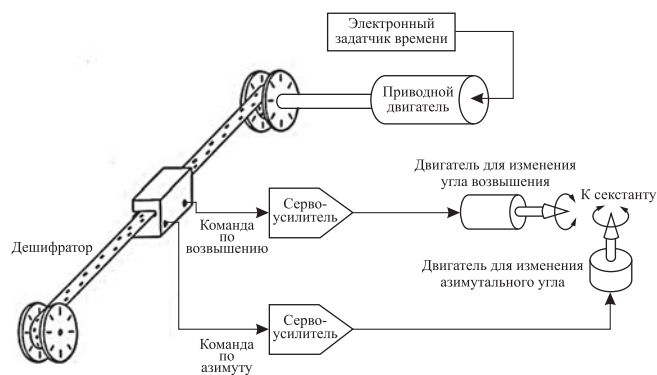


Рис. 2. Система определения положения секстанта

ма, как показано на рис. 2, получает сигналы с ленточного дешифратора. На ленту заранее наносятся данные о положении и скорости снаряда на всё время полёта. Данные об углах азимута и возвышения должны дешифроваться в определённое время, когда звезда находится под данным углом к определённой точке на поверхности Земли. Телескоп направляется на звезду с использованием информации, снимаемой с ленты, для слежения за звездой он программируется специальным образом.

Положение звезды в центре поля телескопа определяется с помощью сканирующей системы.

В настоящее время АНС проектируются на более совершенных принципах [6]. Современный НК, включающий АИНС LN-120G, состоит из лазерных гироскопов, кварцевых акселерометров, приёмника СНС и астровизира с механическим приводом [6].

Включение в НК АНС позволяет существенно повысить точность навигационных определений БЛА, так как АНС не зависит от дальности его полёта, поэтому он может использоваться в полярных и экваториальных областях. Отсутствие инвариантных свойств АНС успешно компенсируется другими системами в составе НК.

**Нелинейный фильтр Калмана.** Схема коррекции НК предполагает использование алгоритма оценивания для вычисления погрешностей ИНС и последующую компенсацию их в выходном сигнале системы. В качестве алгоритма оценивания часто используется фильтр Калмана [3] и его различные модификации [12], а также НФК и его модификации [7–14].

Модель погрешностей ИНС имеет вид [15]

$$x_k = \Phi_k(x_{k-1}) + w_k, \quad (1)$$

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

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

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (2)$$

где  $z_k$  — вектор измерений;  $H_k$  — матрица измерений;  $w_k$  и  $v_k$  — дискретные аналоги гауссового белого шума с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами ковариаций  $Q_k$  и  $R_k$  соответственно, некоррелированные между собой.

Уравнения НФК имеют следующий вид [15, 16]:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \hat{x}_{k,k-1} + K_k(\hat{x}_{k-1})[z_k - H_k \hat{x}_{k,k-1}]; \\ \hat{x}_{k,k-1} &= \Phi_k(\hat{x}_{k-1}); \\ K_k(\hat{x}_{k-1}) &= P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1}; \\ P_{k,k-1} &= \frac{\partial \Phi_k(\hat{x}_{k-1})}{\partial x_{k-1}^T} P_{k-1} \left[ \frac{\partial \Phi_k(\hat{x}_{k-1})}{\partial x_{k-1}^T} \right]^T + Q_k; \\ P_k &= [I - K_k(\hat{x}_{k-1}) H_k] P_{k,k-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $K_k(\hat{x}_{k-1})$  — матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана;  $I$  — единичная матрица;  $P_k$  — ковариационная матрица ошибок оценивания.

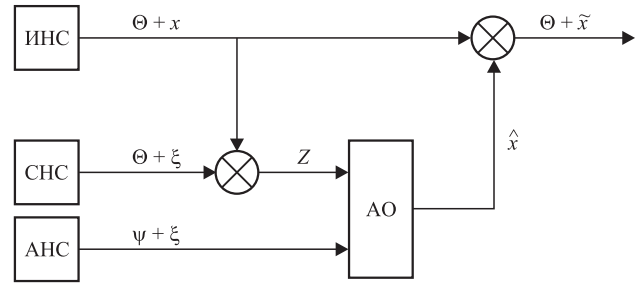
Но такой подход применим лишь в случае унимодального характера апостериорной плотности, когда апостериорная плотность многоэкстремальна, используется алгоритм, в котором апостериорная плотность представлена набором дельта-функций.

**Оценивание погрешностей АИНС.** В НК параметры БЛА рассчитываются на основе измерений СНС и АНС. Недостатком способов реализации НФК является высокая вычислительная сложность.

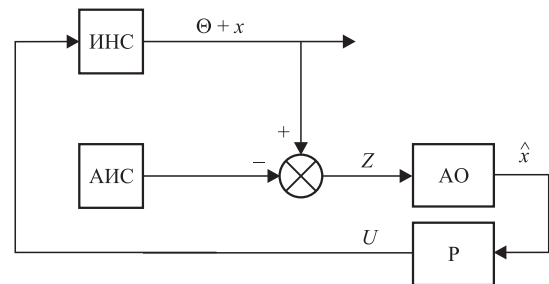
Известен подход [15], который заключается в том, что измерения от АНС входят как известная функция в модель погрешностей ИНС, а не в уравнение измерений.

Для наиболее полной компенсации погрешностей ИНС используются различные схемы коррекции с применением алгоритмов оценивания. На рис. 3 представлена наиболее распространённая схема коррекции НК в выходном сигнале с помощью алгоритма оценивания, в качестве которого используются адаптивные фильтры Калмана или НФК.

В условиях отсутствия информации от СНС используется схема коррекции АИНС. Точность корректируемой ИНС также зависит от ошибок используемого алгоритма, в част-



**Рис. 3. Схема коррекции НК с алгоритмом оценивания:**  $\psi, \Theta$  — истинная навигационная информация;  $\xi$  — вектор погрешностей СНС;  $Z$  — смесь погрешностей ИНС и СНС



**Рис. 4. Функциональная схема АИНС с коррекцией в структуре ИНС**

ности, от адекватности математической модели погрешностей ИНС.

При функционировании ИНС на длительных интервалах времени без коррекции углы отклонения ГСП возрастают. Следствием этого является неадекватность математической модели реальному процессу изменения погрешностей ИНС. В этом случае применяют коррекцию ИНС в структуре системы посредством алгоритмов управления [3]. Функциональная схема АИНС с коррекцией в структуре ИНС представлена на рис. 4.

В качестве модели оцениваемого процесса использованы стационарные нелинейные уравнения ошибок ИНС для горизонтальных каналов [12, 16]:

$$\begin{aligned} \delta \dot{V}_N &= g \sin \psi_E + B_N; \\ \delta \dot{V}_E &= -g \cos \psi_E \sin \psi_N + B_E; \\ \dot{\psi}_N &= \frac{\delta V_E}{R} + \varepsilon_N^{др}; \\ \dot{\psi}_E &= -\frac{\delta V_N}{R} \cos \psi_N + \varepsilon_E^{др} \cos \psi_N, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\delta V_N, \delta V_E$  — ошибки ИНС в определении скорости;  $\psi_N, \psi_E$  — углы отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника;  $\varepsilon_N^{др}, \varepsilon_E^{др}$  — скорости дрейфов ГСП;  $R$  — радиус Земли;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $B_N, B_E$  — смещение нулей акселерометров.



Модель скорости дрейфа ГСП для северного канала имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_N = -\omega\varepsilon_N + A\sqrt{2\omega}w, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_N$  — скорость дрейфа ГСП;  $\omega$  — средняя частота изменения случайного дрейфа ( $\omega = 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ );  $A$  — среднеквадратичное отклонение случайного значения дрейфа;  $w$  — белый шум.

Скорость дрейфа ГСП для восточного канала имеет аналогичный вид.

Уравнения (4) и (5) представляют собой модель ошибок ИНС. Линейные модели погрешностей ИНС имеют невысокую точность, так как учитываются только доминирующие составляющие процесса изменения погрешностей. Поэтому для получения более высокой точности измерительных комплексов (ИК) целесообразно использовать нелинейные модели погрешностей ИНС.

Чтобы сформировать управление  $u(t)$  в схеме рис. 4, представим систему (1) в эквивалентном виде, используя SDC-метод.

В частной постановке задачи синтеза управления нелинейной системой с использованием SDC-метода известен нелинейный алгоритм для коррекции ИНС [9].

**Нелинейный алгоритм коррекции погрешностей ИНС.** Уравнения погрешностей ИНС представляют собой уравнения ошибок ориентации и уравнения погрешностей горизонтальных акселерометров. Можно упростить модель (4), (5), тогда для одного горизонтального канала погрешностей ИНС модель примет вид [10]

$$\begin{aligned} \delta \dot{V} &= -g\psi + B; \\ \dot{\psi} &= \frac{\delta V}{R} - \frac{\delta V}{R}\psi + \varepsilon; \\ \dot{\varepsilon} &= -\mu\varepsilon + \eta, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\delta V$  — погрешность в определении скорости;  $\psi$  — угол отклонения ГСП;  $\varepsilon$  — скорость дрейфа ГСП;  $B, \eta$  — марковские случайные процессы;  $R$  — радиус Земли;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\mu$  — средняя частота случайного изменения дрейфа.

Уравнения (6) в матричной форме имеют следующий вид:

$$\dot{x}(t) = f[t, x(t)] + w(t), \quad (7)$$

где

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta V \\ \psi \\ \varepsilon \end{bmatrix}; \quad f(t, x) = \begin{bmatrix} -gx_2 \\ \frac{x_1}{R} + \frac{x_1 x_2}{R} + x_3 \\ -\mu x_3 \end{bmatrix}; \quad w(t) = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ \eta \end{bmatrix}.$$

После преобразования модели (7) SDC-методом получим

$$\dot{x}(t) = A(t, x)x(t) + w(t), \quad (8)$$

$$\text{где } A(t, x)x(t) = \begin{bmatrix} 0 & -g & 0 \\ \frac{1}{R} & \frac{x_1}{R} & 1 \\ 0 & 0 & -\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}.$$

В дискретной форме модель (8) имеет вид

$$x_k = Fx_k + w_k, \quad (9)$$

$$\text{где } x_k = \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \psi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \quad w_k = \begin{bmatrix} B_k \\ 0 \\ \eta_k \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} 1 & -Tg_k & 0 \\ \frac{T}{R_k} & 1 + \frac{T\delta V_k}{R_k} & T \\ 0 & 0 & 1 - T\mu \end{bmatrix};$$

$T$  — шаг дискретизации.

Разбивая вектор  $x$  на два подвектора  $z_k$  и  $y_k$ , выделим в векторе  $z_k$  ошибки в определении скорости и углы отклонения ГСП относительно сопровождаемого трёхгранника выбранной системы координат. Управление осуществляется на основе подвектора  $z_k$  с помощью подачи сигналов на датчики момента и первые интеграторы ИНС. Тогда модель (9) примет вид

$$x_k = Fz_{k-1} + Gy_{k-1} + w_{k-1} + u_{k-1}. \quad (10)$$

Введём обозначение

$$w_{k-1} + Gy_{k-1} = \zeta_{k-1}. \quad (11)$$

Функционал качества имеет вид

$$J = \text{tr} M[x_k x_k^T] - \min.$$

Минимум функционала достигается при  $K_{k-1} = F$ .

**Экспериментальные исследования.** Результаты математического моделирования продемонстрировали преимущество НК с коррекцией в структуре ИНС. Моделирование проводилось на интервале 1 и 3, 4. В первом случае точность коррекции практически одинакова, а при более длительном временном интервале коррекция в структуре ИНС позволяет получить более точную навигационную информацию. Оценка точности коррекции НК на интервале 3, 4 с помощью НФК (НК и

## Оценка точности НК

Алгоритмы	Точность коррекции, %
НК и НФК	86
НК, НФК, Р	92

НФК), а также НК с НФК и регулятором (НК, НФК, Р) приведены в таблице.

**Выводы.** Наиболее точная навигационная информация о параметрах БЛА определяется с помощью комплексирования ИНС, СНС и АНС. Предложена функциональная схема комплексирования ИНС и АНС, предусматривающая коррекцию в структуре ИНС. С помощью сформированных управляющих сигналов на датчики моментов и первые интеграторы удаётся исключить нарастание углов отклонения ГСП ИНС и сохранить адекватность выбранной модели погрешностей ИНС в НФК. При формировании управляющих сигналов ИНС использован SDC-метод.

## Библиографические ссылки

1. **Неусыпин К.А.** Алгоритмические методы повышения точности автономных навигационных систем // Автоматизация. Современные технологии. 2006. № 2. С. 16—19.
2. **Агеев В.М., Павлова Н.В.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990. 375 с.
3. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: МГОУ, 2009. 500 с.
4. **Локк А.С.** Управляемые снаряды. М.: Наука, 1972. 392 с.
5. **Воробьёв Л.М.** Астрономическая навигация летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1968. 279 с.
6. **Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Людомирский М.Б., Каютин И.С., Ямщиков Н.Е.** Принципы построения астроинерциальных систем

авиационного применения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 9—29.

7. **Proletarsky A.V., Neusypin K.A.** Reserch scalar filtering algorithm with selforganization method for modeling control system // Science and Military. 2010. Vol. 5. No. 2. P. 80—82.

8. **Proletarsky A.V., Neusypin K.A.** Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft // Science and Military. 2010. Vol. 5. No. 1. P. 75—79.

9. **Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 10—14.

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

11. **Неусыпин К.А., Шэнь Кай.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 5. С. 9—12.

12. **Neusypin K.A., Shen Kai, Liu Rong Zhong.** Modification of nonlinear Kalman filter using self-organizing approaches and genetic algorithms // International Journal of Information Engineering. Dec. 2013. Vol. 03. P. 129—136.

13. **Proletarskiy A.V., Neusypin K.A., Shen Kai.** Modification of Kalman Filtering by Utilizing Linear Trends // European Science Review. 2014. No. 2. P. 16—18.

14. **Афанасьев В.Н.** Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами. М.: Либроком/URSS, 2015.

15. **Шахтарин Б.И.** О нелинейных оптимальных и квазиоптимальных фильтрах Стратоновича // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 11. С. 1324—1336.

16. **Шахтарин Б.И., Шэнь Кай, Неусыпин К.А.** Модификация нелинейного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1065—1072.

## Ссылка для цитирования

**Чьюнг Ф.С.** Способ коррекции астроинерциальной системы летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 320—324. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-320-324.

## Уважаемые читатели!

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

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 621.865.8

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-325-328

**С.О. Никифоров**, д-р техн. наук, проф., **Т.В. Кочева**, канд. техн. наук,  
**Б.Е. Мархадаев**, канд. техн. наук  
(Институт физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ),  
**Е.Р. Урмакшинова**, канд. техн. наук, доц.  
(Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ),  
**Б.С. Никифоров**, канд. техн. наук  
(Бурятская сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова, г. Улан-Удэ)  
tavako@mail.ru

## ОСОБЕННОСТИ ПРОТОТИПИРОВАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ДЕМОНСТРАЦИОННЫХ РОБОТОВ

*Рассмотрены особенности прототипирования кинематики движений конечностей человека при реализации демонстрационных роботов на основе шарнирного трёхзвенника.*

**Ключевые слова:** демонстрационный робот; трёхзвенный манипулятор; траектория движения; координация движений рук робота.

*The features of prototyping the movement kinematic of human extremities during in the implementation of demonstration robots based on a hinged three-link are considered.*

**Keywords:** demonstration robot; three-link manipulator; trajectory of movement; coordination of robot arm movements.

**Введение.** Одним из условий перехода к рыночному хозяйству и последующего его развития в России является становление рыночной инфраструктуры. На выставках и ярмарках производственные компании широко используют товарные прототипы, т. е. различные технические объекты, которые привлекают внимание посетителей и наглядно демонстрируют особенности их достижений. Интерес к продукции может быть повышен, если её рекламирует демонстрационный робот (ДР), имитирующий движения человека. В таких объектах часто интегрируются возможности механики и электроники, поэтому ДР могут быть отнесены к области мехатроники.

Известно, что в первую очередь внимание зрителей привлекают динамические демонстрационные стенды и установки, в которых важнейшим и наиболее выразительным компонентом выступает движение. Демонстрационные стенды могут строиться исключительно на средствах электроники: в этих случаях движущиеся изображения создаются на экранах электронно-лучевых трубок, многоэлементных панелях, дисплеях типа бегущей строки и пр. Однако, на наш взгляд, этих средств не всегда бывает достаточно для обеспечения требуемой действенности и выразительности при

демонстрации свойств реальных изделий и их функциональных элементов, поскольку стенды с реально работающими устройствами или макетами, в которых реализуется настоящее механическое движение различных устройств, могут оказаться в этом смысле более зрелищными.

**Специфика демонстрационных роботов.** Под аббревиатурой ДР предлагается объединить устройства с автоматическим или автоматизированным приводом, предназначенные исключительно для целей демонстрации, где слово «демонстрационные» определяет назначение, но никак не ограничивает другие стандартизованные показатели подобных интегральных устройств (тип привода, кинематическая схема, тип системы автоматического управления и пр.).

Специфика ДР как объектов математического моделирования заключается в том, что требования к выполнению движений не определяются жёстко, как для промышленных роботов (ПР). Содержательная постановка задач их динамики изменяется в зависимости как от сюжетов и сценографии демонстрации, так и по этапам проектирования. Следует различать две типовые ситуации.

1. ДР демонстрирует себя и не взаимодействует с какими-либо внешними объектами. Таким, в частности, является робот, который

танцует или жестикулирует. В этих случаях задаётся последовательность положений звеньев и налагаются довольно мягкие ограничения на законы изменения скорости (плавность движений), интервалы времени и координированность. Точность выхода в заданные точки несущественна, что совершенно нетипично для ПР.

2. Робот взаимодействует с другими объектами, например, захватывает предметы и перекладывает их в другое место [1]. Другой пример — робот указывает лазерной указкой на демонстрируемые предметы. Эта ситуация нетипична для промышленной робототехники, где критерии известны и чётко реализуемы. Основными из них являются такие показатели, как грузоподъёмность, размеры рабочей зоны, величина хода по степеням подвижности, средние скорости перемещений, максимальное значение ускорений, значения погрешностей позиционирования или отработки программных траекторий. При этом обычно наибольшее внимание обращается на расчёт погрешностей в статических и особенно динамических режимах [2].

При создании ДР обычно ориентируются на определённые прототипы [3—5]. В качестве прототипа при имитации движений рук человека предлагается трёхзвенный манипулятор (шарнирный трёхзвенник) [6].

**Реализация ДР в виде шарнирного трёхзвенника.** Предполагается, что малые перемещения частей, звеньев и элементов прототипа исключаются. В частности, в работе [6], исходя из анализа точности движений шарнирной трёхзвенной руки для обеспечения наилучшей точности позиционирования, получено эталонное соотношение длины плеча, предплечья и кисти — 2:2:1, т. е. примерно так же, как у руки человека.

Исполнительное устройство ДР предлагается в виде механизма, состоящего из системы твёрдых (жестких) тел (звеньев, соединённых кинематическими парами) с голономными связями и совокупности приводов.

Для получения картины качественных особенностей подобных ДР достаточно рассмотреть только кинематику движений; в этом случае обобщённые координаты задаются, по возможности, как простые функции времени от заданного начального положения к заданному конечному положению. На конфигурации в промежуточных положениях дополнительные требования могут накладываться или не накладываться.

Рассмотрим возможности задания простых законов движения по степеням подвижности

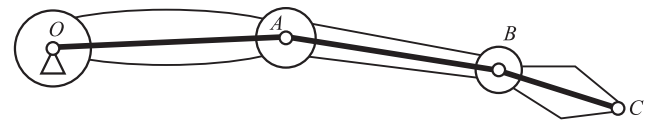


Рис. 1. Представление руки в виде шарнирного трёхзвенника

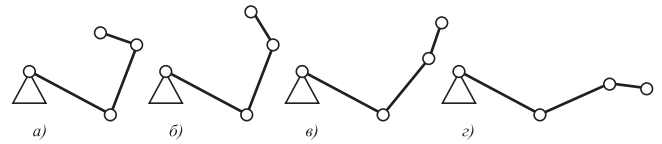


Рис. 2. Фазы перехода трёхзвенной руки из начального положения (а) в конечное (г)

для плоского движения руки, представляемой в виде шарнирного трёхзвенника. Плечо (звено  $OA$ ), предплечье (звено  $AB$ ) и кисть  $BC$  считаются жёсткими (рис. 1).

На рис. 2 показаны промежуточные фазы перехода руки из одного положения, принимаемого за начальное, в конечное.

На основе анализа произведений изобразительного искусства и полученных кинограмм (рис. 3 и 4) в качестве основных вариантов прототипирования статических положений рук ДР были выбраны характерные

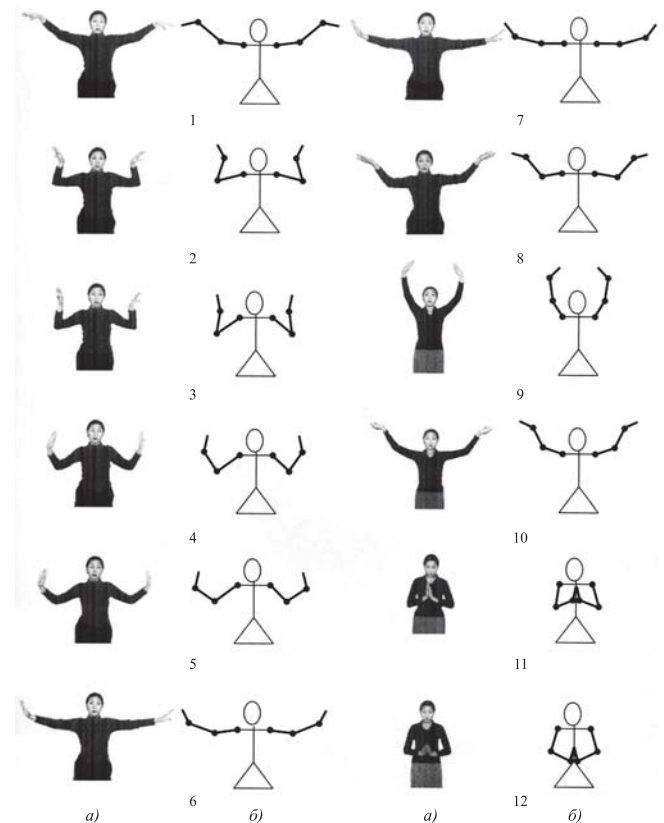


Рис. 3. Кинограмма симметричных движений рук модели (а) и схематичное изображение положений звеньев демонстрационного робота (б) (12 положений)

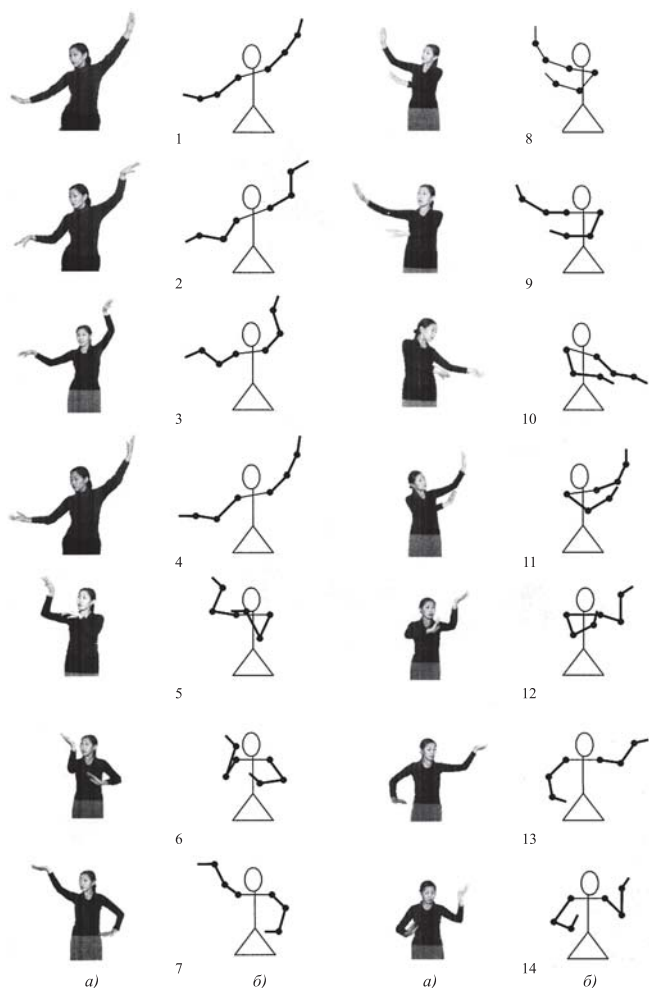


Рис. 4. Кинограмма асимметричных движений рук модели (а) и схематичное изображение положений звеньев демонстрационного робота (б) (14 положений)

позы фигуры танцовщицы, руки которой занимают устойчивые положения в определённых позициях.

Просмотр на экране монитора нескольких вариантов законов поворота одного звена на большой угол с различными законами изменения угловой скорости (прямоугольным, треугольным, трапецидальным), представленными на рис. 5, показывает, что при одном

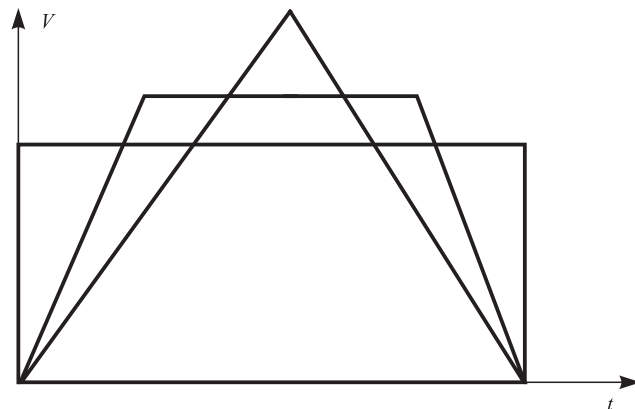


Рис. 5. Графики законов изменения угловой скорости звена руки

и том же времени перемещения зрительно они мало различаются.

Данное положение совпадает с выводами, полученными И.С. Знаменским [7]. Поэтому отработку движений одной руки можно проводить при одинаковых по виду простейших законах поворота в шарнирах, а именно, при постоянстве во времени угловых скоростей, т. е. при линейных законах изменения абсолютных углов поворота звеньев в шарнирах. При этом имеется в виду, что в зависимости от скоростей моменты начала и окончания вращения каждого звена могут различаться, и для зрительного восприятия важно, какое именно движение начинается или заканчивается раньше. На рис. 6 приведены примеры графиков изменения шарнирных углов  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  относительного поворота в шарнирах  $O, A, B$  соответственно (см. рис. 1).

Априори естественным представляется вариант, при котором движения по обобщённым координатам начинаются и заканчиваются одновременно (см. рис. 6, а). Однако в соответствии с экспертными оценками предпочтительными являются варианты (см. рис. 6, б и в), для которых движение первого звена опережает движение второго звена, и последним происходит движение третьего звена.

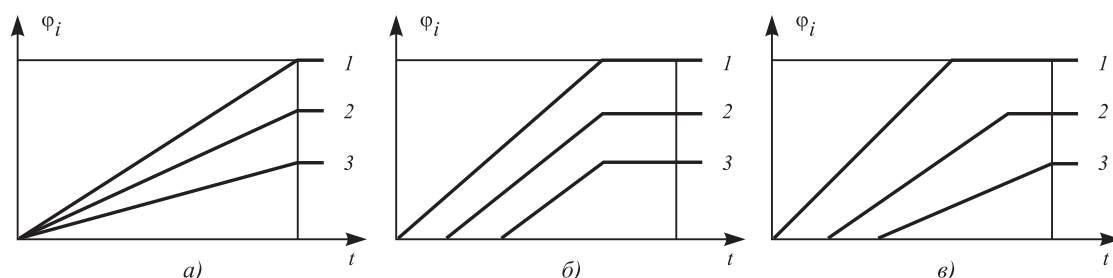


Рис. 6. Графики изменения шарнирных углов: 1—3 —  $\varphi_1, \varphi_2$  и  $\varphi_3$  соответственно

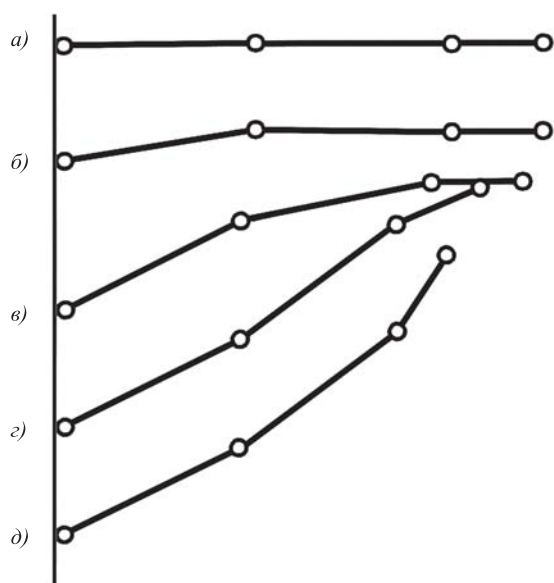


Рис. 7. Графики движения звеньев руки

При этом окончание процесса движения может быть одновременным (см. рис. 6, б) или неодновременным (см. рис. 6, в). Возможно также задавать движение, начиная с последнего звена. В обоих случаях движение имеет волновой характер (рис. 7), причём волна, бегущая от корня к концу, является более естественной, чем движущаяся от конца к началу.

**Координирование движений двух рук.** Наиболее простым в этом смысле является вариант полностью симметричного движения двух рук, серия положений которых приведена на рис. 3, б. Очевидно, что при симметричных движениях позвоночник модели (центральная опора) не должен двигаться.

Возможно повторение движений одной руки другой рукой с определённым запаздыванием. Интересным представляется также вариант асимметричного движения обеих рук (см. рис. 4, б). При асимметричных движениях рук изгибается позвоночник. Из результатов анализа модели известно, что наиболее естественным является наклон плечевого пояса и, следовательно, изгиб позвоночника в ту же сторону, что и движение рук. Хотя углы поворота коромысла с плечевыми шарнирами значительно меньше, чем у рук, они существенно оживляют динамику. Аналогичные подходы и выводы справедливы и для движений ног, которые здесь не рассматриваются.

**Заключение.** Механизм антропоморфного демонстрационного робота целесообразно проектировать по упрощённым схемам, чтобы было возможно выполнять ограниченные, вполне определённые и довольно простые

движения. Это позволяет многократно упрощать кинематические схемы, использовать обычные системы автоматического управления и управляющие программы.

Прототипирование антропоморфного демонстрационного робота достаточно эффективно осуществляется на основе шарнирного трёхзвенного манипулятора, обеспечивающего упрощённую кинематику движений конечностей человека (рук).

Для координации движений рук такого ДР и характеристик их устойчивых положений предпочтительно использовать кинограммы движений человека, что даёт возможность запрограммировать изменение положений звеньев антропоморфного демонстрационного робота, наглядно и полноценно продемонстрировать его функциональные возможности.

#### Библиографические ссылки

1. Nikiforov S.O., Chelpanov I.B., Markhadaev B.E., Mandarov E.B. Cycloidal (rotary) demonstration robots // Journal of Mechanical Engineering. 2004. No. 1. P. 20—24.
2. Мархадаев Б.Е., Никифоров С.О. Точностные модели промышленных роботов. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1998. 178 с.
3. Дьяченко В.А., Челпанов И.Б., Никифоров С.О., Хозонхонова Д.Д. Материалы и процессы аддитивных технологий (быстрое прототипирование). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2015. 200 с.
4. Никифоров С.О., Мархадаев Б.Е., Парамонова Е.Г., Беликов В.А., Улаханов Н.С., Данзанов А.И., Данзанова А.И. Программный прототип моделирования траектории рабочего органа безреверсного манипулятора // Свид-во о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2013618528. 06.09.2013.
5. Никифоров С.О., Хозонхонова Д.Д., Никифоров Б.С. Классификационные признаки аддитивных технологий и средств быстрого прототипирования // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 8. С. 377—384.
6. Никифоров С.О., Смольников Б.А. Оптимизация параметров трёхзвенного манипулятора // Робототехника. 1976. С. 50—54.
7. Знаменский И.С., Челпанов И.Б. Демонстрационные роботы, предназначенные для использования на выставках и презентациях / Материалы межвуз. научн. конф. в рамках XXIX недели науки СПбГТУ. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 4—5.

#### Ссылка для цитирования

Никифоров С.О., Кочева Т.В., Мархадаев Б.Е., Урмакшинова Е.Р., Никифоров Б.С. Особенности прототипирования кинематических движений конечностей человека при реализации демонстрационных роботов // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 325—328. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-325-328.



УДК 681.5:681.3

DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-329-334

**Д.М. Чан**

(Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, г. Ханой, Вьетнам)

ruxi.tran@gmail.com

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА НАСТРОЙКИ СУБОПТИМАЛЬНОГО КОЭФФИЦИЕНТА МАСШТАБИРОВАНИЯ В ЗАДАЧЕ ФИЛЬТРАЦИИ БИНС**

*Предложен модифицированный сильный следящий ансамбльный фильтр Калмана для нелинейных динамических систем. Введена матрица субоптимального коэффициента масштабирования в ковариацию прогнозирования для обеспечения устойчивости и гладкости оценки при возникновении неопределённости модели процесса. Показано, что использование нечёткого алгоритма для настройки коэффициента смягчения в режиме реального времени позволяет избежать потери точности в сегментах, в которых модель процесса определена. В результате моделирования задачи коррекции БИНС установлено, что предложенный нечёткий фильтр обладает хорошей гладкостью оценки и высокой точностью.*

**Ключевые слова:** БИНС; субоптимальный коэффициент масштабирования; коэффициент смягчения; нечёткая модель Такаги — Сугено.

*A modified strong tracking unscented Kalman filter for nonlinear dynamical systems is proposed. A matrix of the suboptimal scaling factor is introduced into the prediction covariance to ensure evaluation stability and smoothness at appearance of the process model uncertainty. It is shown that the use of a fuzzy algorithm to adjust the softening coefficient in real time allows to avoid the loss of accuracy in the segments in which the process model is defined. As a result of modeling the SINS correction task, it was found that the proposed fuzzy filter has good evaluation smoothness and high accuracy.*

**Keywords:** SINS; suboptimal scaling factor; softening coefficient; fuzzy Takagi — Sugeno model.

**Введение.** Модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), описываемая существенно нелинейными дифференциальными уравнениями, может включать неопределённости (несоответствие параметров модели, стохастические дрейфы гироскопов и акселерометров, статистические ошибки начальных условий и системные шумы). В результате оценка состояния методами, основанными на структуре базового фильтра Калмана (ФК) (расширенный ФК, семейство ФК на основе сигма-точечного подхода, сильный следящий ФК и их модификации [1—7]), будет ненадёжной.

Для обеспечения устойчивости оценки при возникновении неопределённости предложены различные подходы, использующие нечёткие модели. В работах [8—10] предложен нечёткий подход к расширенному ФК для выбора весовых коэффициентов в зависимости от изменения ошибки оценки. В работах [11] и [12] применена нечёткая модель Такаги—Сугено—Канга к ансамбльному фильтру в целях формирования весовых коэффициентов для априорного состояния, априорной оценки измерений и коэффициента усиления.

В работе [13] система нечётких рассуждений построена для динамического оперативного определения лучших нижних и верхних границ ковариации шума процесса в соответствии с информацией об инновациях, не учитывая неопределённость модели измерений. Перечисленные работы приемлемы только для слаболинейной системы низкого порядка и не решают проблему неопределённости модели процесса и модели измерения в целом.

Применению матрицы субоптимального коэффициента масштабирования (СКМ) для борьбы с расхождением в нелинейных системах с динамическими неопределённостями посвящены работы [14—16]. Матрица СКМ, основанная на принципе ортогональности векторов инноваций в сильном следящем ансамбльном ФК (ССАФК), добавляется к матрице ковариации прогнозирования для уменьшения веса предшествующего знания и корректировки матрицы усиления Калмана. Среди работ, посвящённых ССАФК, перспективным является применение нечёткой модели для настройки в режиме реального времени коэффициента смягчения, входящего в матрицу СКМ, при изменении динамики объекта. Эффективность такого под-



хода к задаче интеграции БИНС представлена в работах [17—20]. Однако эти подходы имеют следующие недостатки: во-первых, априорный коэффициент и коэффициент смягчения постоянны и выбираются эмпирически; во-вторых, матрица СКМ включена в течение всего процесса фильтрации, что приводит к потере точности в тех временных сегментах, в которых модель процесса известна.

В данной работе для улучшения эффективности и производительности процесса фильтрации предложен адаптивный нечёткий алгоритм, в котором применена нечёткая логическая адаптивная система (НЛАС) для настройки коэффициентов матрицы СКМ в режиме реального времени по каналам, а также введено пороговое условие для переключения режимов адаптации.

### Нелинейная математическая модель БИНС.

Уравнения состояния БИНС с учётом возмущений представляются в виде следующей нелинейной системы [21—23]:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k, \quad (1)$$

где  $\mathbf{x} = [(V^n)^T, (P)^T, (q)^T, \nabla^b, \varepsilon^b]^T$  — вектор состояния, включающий в себя скорость  $V^n = [V_E, V_N, V_{Up}]^T$ ;  $P = (\varphi, \lambda, h)^T$  — положение ( $\varphi$  — широта,  $\lambda$  — долгота и  $h$  — высота);  $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$  — кватернионы;  $\nabla^b$  и  $\varepsilon^b$  — погрешности акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС) соответственно;  $\mathbf{w}$  — шум процесса ( $n \times 1$ );  $\mathbf{f}(\cdot)$  — вектор нелинейной функции модели БИНС:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} V_k^n + T_s(C_{b,k}^n f_{ib,k}^b + g_k^n - (2\Omega_{ie,k}^n + \Omega_{en,k}^n)V_k^n); \\ P_k + T_s A_k V^n; \\ q_k + \frac{T_s}{2} [\Omega_1(\omega_{ib,k}^b) - \Omega_2(\omega_{in,k}^n)] q_k; \\ \nabla_k; \\ \varepsilon_k. \end{bmatrix}$$

Здесь  $T_s$  — шаг дискретизации, за который принимается интервал между измерениями БИНС;  $f_{ib}^b = [f_x^b, f_y^b, f_z^b]^T$  — показания акселерометров;  $g_k^n$  — ускорение свободного падения;  $\Omega_{ie}^n$  и  $\Omega_{en}^n$  — кососимметрические матрицы от угловой скорости вращения Земли в  $n$ -СК  $\omega_{ie}^n = [0, \omega_{ie} \cos \varphi, \omega_{ie} \sin \varphi]^T$  и угловой скорости  $n$ -СК относительно  $e$ -СК  $\omega_{en}^n = [-\dot{\varphi}, \dot{\lambda} \cos \varphi, \dot{\lambda} \sin \varphi]^T$ ;  $\omega_{ie} = 7,292115 \cdot 10^{-5}$  — угловая скорость вращения Земли;  $n$ -,  $b$ -,  $i$ -,  $e$ -СК — навигационная, связанная, инерциальная, земная системы координат (СК) соответственно.

Модель гравитационного ускорения  $g^n$  в  $n$ -СК имеет вид

$$g^n = [0, 0, -g^n]^T;$$

$$g^n = 9,7803 + 0,519 \sin^2 \varphi - 3,08 \cdot 10^{-6} h.$$

Матрицы  $\mathbf{A}$ ,  $\Omega_1(\omega_{ib}^b)$ ,  $\Omega_2(\omega_{in}^n)$  определяются по формулам

$$\mathbf{A} = \left[ 0, \frac{1}{M+h}, 0; \frac{1}{(N+h) \cos \varphi}, 0, 0; 0, 0, 1 \right];$$

$$\Omega_1(\omega_{ib}^b) = \begin{bmatrix} -\Omega_{ib}^b & \omega_{ib}^b \\ -(\omega_{ib}^b)^T & 0 \end{bmatrix};$$

$$\Omega_2(\omega_{in}^n) = \begin{bmatrix} -\Omega_{in}^n & \omega_{in}^n \\ -(\omega_{in}^n)^T & 0 \end{bmatrix};$$

где  $M = \frac{R_e(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$  и  $N = \frac{R_e}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$  — радиусы кривизны земного эллипсоида;  $R_e = 6\,378\,140$  м — радиус Земли;  $e = 0,0033528$  — эксцентриситет;  $\omega_{ib}^b$  — показание ДУС.

Матрица перехода из навигационной СК в связанную  $C_b^n = (C_b^n)^T$  может быть представлена через кватернионы:

$$C_b^n = \begin{bmatrix} 2q_0^2 + 2q_1^2 - 1 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2q_0^2 + 2q_2^2 - 1 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & 2q_0^2 + 2q_3^2 - 1 \end{bmatrix}.$$

Уравнение измерений представляется в виде

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k, \quad (2)$$

где  $\mathbf{z}_k = [(V_{GPS}^T, (P_{GPS})^T)^T]$  — вектор измерения от внешних источников (СНС);  $\mathbf{v}$  — шум измерения;  $\mathbf{h}(\cdot)$  — линейные функции модели измерения:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_k) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{10 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{10 \times 3} \end{bmatrix} \mathbf{x}_k.$$

Из уравнений (1) и (2) модель фильтра к задаче БИНС можно описать следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{w}_k; \\ \mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\mathbf{w}$  и  $\mathbf{v}$  имеют нулевое математическое ожидание и ковариационные матрицы  $\mathbf{Q}_k$  и  $\mathbf{R}_k$  соответственно.

Рассмотрим следующие случаи неопределённости:

1) измерительные приборы (акселерометр и ДУС) имеют неопределённые параметры, в частности, в некотором интервале дрейфы акселерометра и ДУС меняются скачкообразно и их масштабные коэффициенты не постоянны;

2) шумы измерений  $\mathbf{v}$  и процесса  $\mathbf{w}$  не определены.

**Алгоритм настройки субоптимального коэффициента масштабирования.** Сильный следя-

щий ансцентный ФК, разработанный на основе комбинации ансцентного ФК и сильного следящего ФК, является более гладким нелинейным алгоритмом. Для повышения устойчивости ансцентного ФК к неопределённости модели процесса в ансцентный ФК непосредственно добавлен субоптимальный коэффициент затухания, используемый в сильном следящем ФК.

Основная концепция сильного следящего ансцентного ФК состоит во включении изменяющейся во времени матрицы субоптимального коэффициента масштабирования (СКМ)  $\mathbf{S}_k$  в прогнозируемую ковариацию, чтобы уменьшить влияние предшествующих знаний на оценку текущего состояния. В этом случае уравнение прогнозируемой ковариации описывается следующим образом [19, 20]:

$$\mathbf{P}_{x_k}^- = \mathbf{S}_k \left\{ \sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\zeta_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_k^-) (\zeta_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{x}}_k^-)^T \right\} + \mathbf{Q}_k.$$

Матрицу СКМ можно определить аналитически путём решения следующих уравнений:

$$\begin{cases} E[(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)^T] = \min; \\ E[(\mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_k)(\mathbf{z}_{k+j} - \hat{\mathbf{z}}_{k+j})^T] = 0, \quad j = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (4)$$

Первое уравнение в системе является критерием фильтра для достижения оптимального решения, а второе — называется принципом ортогональности. Это означает, что последовательность инноваций должна быть ортогональна друг другу в каждый момент времени, так что вся полезная информация в последовательности инноваций может быть извлечена.

Матрица СКМ зависит от трёх коэффициентов [24]: априорного коэффициента  $\alpha_i$  ( $\alpha_i \geq 1$ ), коэффициента затухания  $\rho$  ( $0 < \rho \leq 1$ ) и коэффициента смягчения  $\beta$  ( $1 \leq \beta \leq 5$ ).

ССАФК имеет следующие недостатки:

априорный коэффициент  $\alpha_i$  и коэффициент смягчения  $\beta$  постоянны и выбираются эмпирически;

при реализации ССАФК матрица СКМ  $\mathbf{S}_k$  включена в течение всего процесса фильтрации, что приводит к потере точности в тех временных сегментах, в которых модель процесса известна.

Для улучшения эффективности и производительности процесса фильтрации в моменты неопределённости модели предложен адаптивный алгоритм настройки СКМ, позволяющий:

1) получать коэффициент смягчения в режиме реального времени с помощью нечёткой логической адаптивной системы (НЛАС)

с нечёткими правилами и в темпе с процессом настраивать коэффициент смягчения  $\beta$  при изменении динамики объекта;

2) вычислять элементы матрицы СКМ не в зависимости от априорного коэффициента, а путём настройки их по каналам;

3) не включать матрицу СКМ в тех временных сегментах, в которых модель процесса известна.

Для этого предлагается использовать пороговые значения инноваций для переключения режимов работы: если значение инновации какого-либо канала не превышает заданной допустимой погрешности, то соответствующий элемент матрицы СКМ сравнивается с единицей, иначе — требуется коррекция.

В результате предложенных модификаций матрица СКМ  $\mathbf{S}_k$  определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_k &= \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_m); \\ s_i &= \max(1, c_i), \quad i = 1, 2, \dots, m; \\ c_i &= \frac{\text{diag}(V_k - \beta_i R_k)}{\text{diag}\left(\sum_{i=0}^{2n} w_i^{(c)} (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{z}}_k^-) (\gamma_{i,k/k-1} - \hat{\mathbf{z}}_k^-)^T\right)}, \\ &\text{если } \mathbf{v}_i \geq \mathbf{v}_{i,\text{доп}}; \\ c_i &= 1, \text{ если } \mathbf{v}_i < \mathbf{v}_{i,\text{доп}}; \\ V_k &= \begin{cases} \mathbf{v}_0 \mathbf{v}_0^T, & k = 1 \\ \frac{\rho \mathbf{v}_{k-1} + \mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T}{1 + \rho}, & k \geq 2; \mathbf{v}_k = \mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_k^- \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

а алгоритм модифицированного нечёткого адаптивного ФК к задаче представлен на рис. 1.

**Результаты моделирования.** При реализации нечёткой логической адаптивной системы (НЛАС) используется нечёткая система Такаги — Сугено первого порядка (Т—С-модель), имеющая два входа (степень расхождения  $\mu$  и усреднённая величина инноваций  $\xi$ ) и один выход (коэффициент смягчения  $\beta$ ) [24]:

$$\mu = \frac{\mathbf{v}_k^T \mathbf{v}_k}{m}; \quad \xi = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |v_i|,$$

где  $\mathbf{v}_k = [v_1, v_2, \dots, v_m]^T$ ;  $m$  — количество измерительных устройств.

Нечёткие правила определяются из условия, что элемент матрицы СКМ для каждого канала системы пропорционален значению его расхождения, а именно, при малой степени расхождения рекомендуется применять больший коэффициент смягчения  $\beta$  для обеспечения лучшей точности оценки и, наоборот,

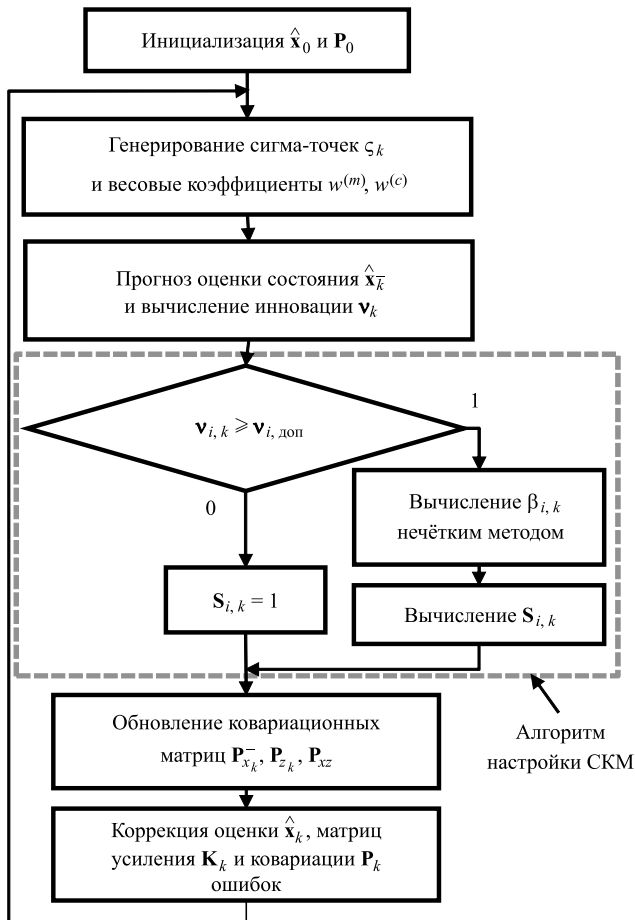


Рис. 1. Алгоритм нечёткого адаптивного фильтра Калмана

рот, меньший коэффициент смягчения  $\beta$  с целью увеличения возможности отслеживания.

Для иллюстрации эффективности предложенного алгоритма настройки на примере БИНС 16-го порядка проведено сравнение адаптивного фильтра Калмана с ССАФК, имеющим различные постоянные коэффициенты смягчения:

фильтр SU1: ССАФК с постоянным коэффициентом смягчения  $\beta_1 = 2$ ;

фильтр SU2: ССАФК с постоянным коэффициентом смягчения  $\beta_2 = 5$ ;

фильтр FUZ: нечёткий адаптивный фильтр Калмана.

Для оценки точности при применении трёх фильтров к рассматриваемой задаче вводятся значения погрешности по каналам (долгота, широта, высота) и сферической погрешности, которые задаются следующим образом:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{ист}} - \varphi_{\text{фильтр}};$$

$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{ист}} - \lambda_{\text{фильтр}};$$

$$\Delta h = h_{\text{ист}} - h_{\text{фильтр}};$$

$$E_{xyz} = \sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta\lambda^2 + \Delta h^2},$$

где  $\Delta\varphi$ ,  $\Delta\lambda$ ,  $\Delta h$  — погрешности по широте, долготе и высоте соответственно;  $\varphi_{\text{ист}}$ ,  $\lambda_{\text{ист}}$ ,  $h_{\text{ист}}$  — истинные координаты по каналам;  $\varphi_{\text{фильтр}}$ ,  $\lambda_{\text{фильтр}}$ ,  $h_{\text{фильтр}}$  — оценки координат с помощью фильтра;  $E_{xyz}$  — сферическая погрешность.

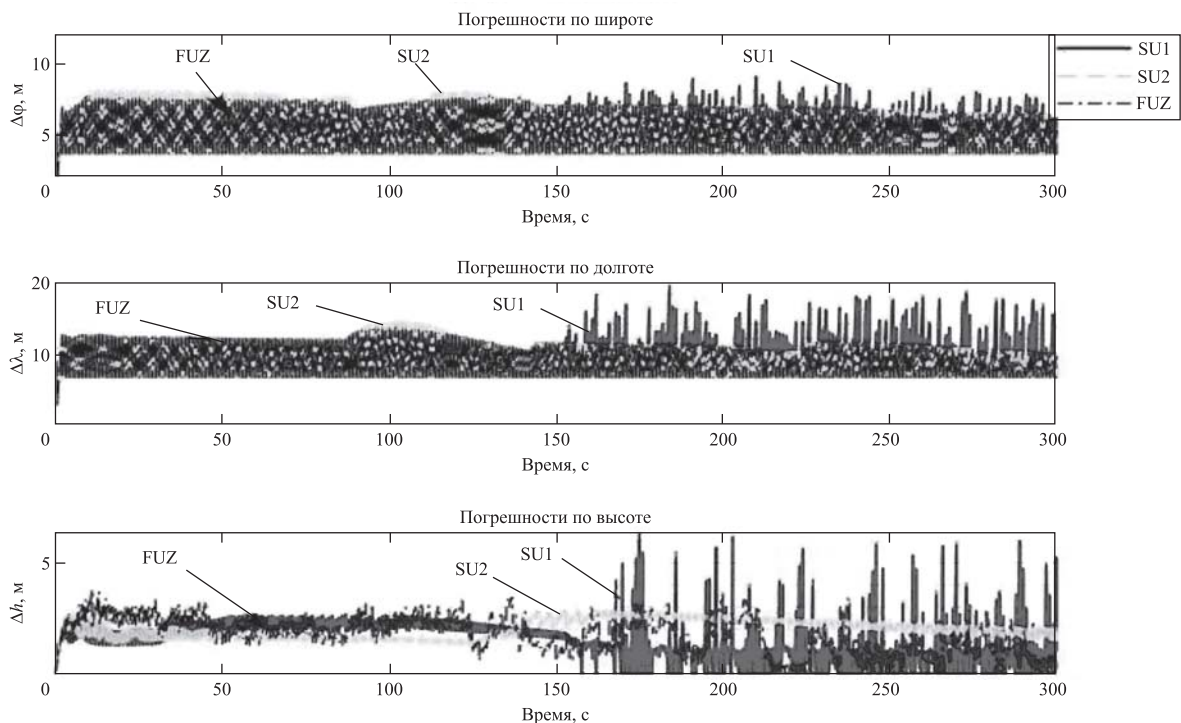


Рис. 2. Погрешности географических координат

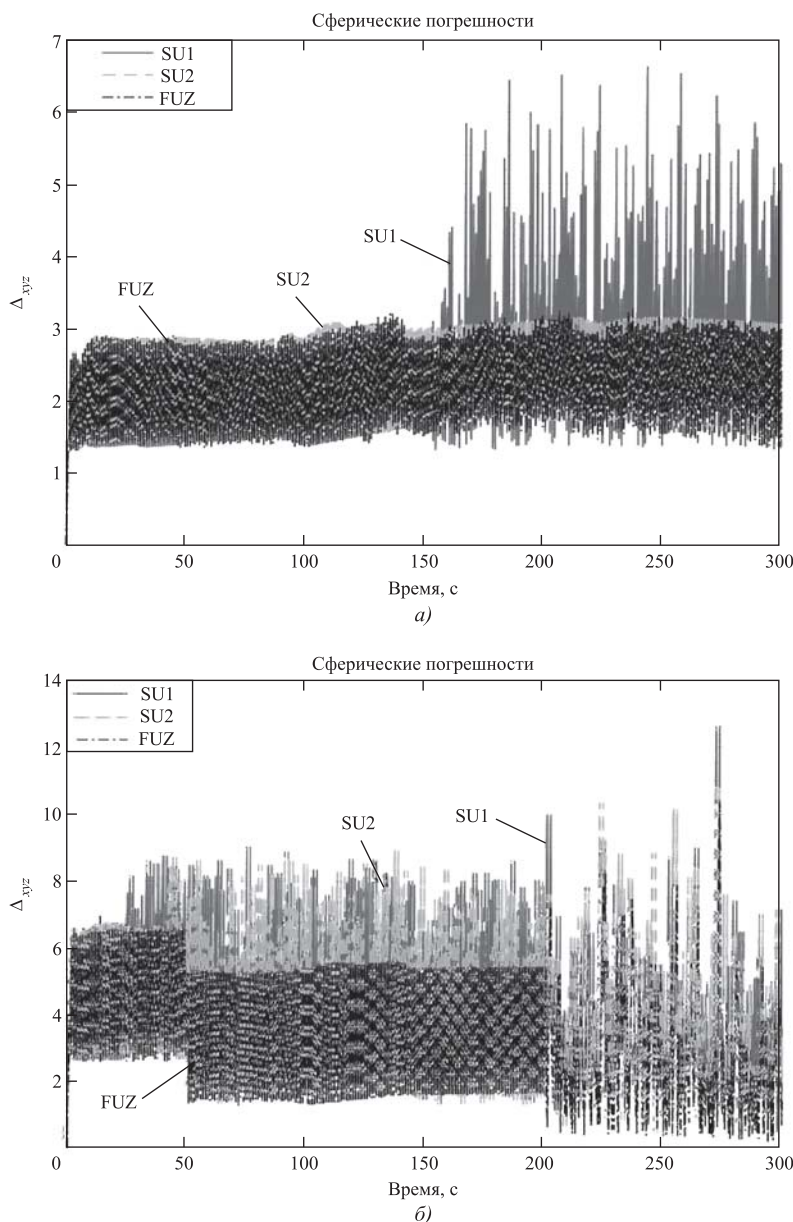


Рис. 3. Сферические погрешности положения

**СКО точности оценки фильтров**

Случай	Фильтры	Долгота	Широта	Высота	$E_{xyz}$
1	SU1	5,4963	9,6926	2,0642	2,5581
	SU2	5,5016	9,2064	2,1232	2,3246
	<b>FUZ</b>	<b>5,4281</b>	<b>9,2029</b>	<b>2,0116</b>	<b>2,2602</b>
	Улучшение, %	<b>6,8</b>	<b>4,9</b>	<b>2,6</b>	<b>11,6</b>
2	SU1	21,0239	37,3271	4,0956	7,3465
	SU2	21,0496	37,4734	4,0173	7,3521
	<b>FUZ</b>	<b>20,9998</b>	<b>36,8732</b>	<b>3,9471</b>	<b>6,5941</b>
	Улучшение, %	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>	<b>3,6</b>	<b>10,2</b>

Моделирование проводилось с различными условиями неопределённости:

1) дрейфы акселерометра и ДУС в некотором интервале меняются скачкообразно;

2) шумы измерения  $v$  и процесса  $w$  не определены.

На рис. 2 приведены погрешности оценки географических координат по трём каналам (случай 1), а сферические погрешности в оценке положения показаны на рис. 3, а (случай 1), рис. 3, б (случай 2).

При фиксированном значении коэффициента смягчения (фильтры SU1, SU2) не адекватно корректируют погрешности по всем каналам. Фильтр FUZ с помощью блока НЛАС и условий переключения позволяет настроить компоненты матрицы СКМ по каналам, что повышает производительность и точность оценки.

Для случаев 1 и 2 рассчитаны значения среднеквадратичного отклонения (СКО) погрешностей по трём каналам трёх фильтров (таблица).

Как следует из полученных расчётов, предложенный фильтр даёт наименьшую погрешность по всем каналам, а также минимальную сферическую погрешность.

**Заключение.** Предложен нечёткий адаптивный фильтр Калмана, полученный на основе сочетания сигматочечного подхода, нечётких адаптивных свойств матрицы субоптимального коэффициента масштабирования и условий переключения режимов адаптации. Полученный алгоритм фильтрации применён к решению задачи фильтрации в БИНС.

Результаты моделирования на примере решения задачи БИНС 16-го порядка показали, что применение нечёткой логической адаптивной системы и введение порогового условия переключения для настройки коэффициента смягчения по каналам улучшают способность точного отслеживания оценки состояния, обеспечивают нечувствительность к выбросам параметров системы, а также повышают общую производительность процесса фильтрации.

В дальнейшем предполагается исследование адаптивного фильтра Калмана для решения задачи БИНС и задачи управления в реальных условиях.

**Библиографические ссылки**

1. Куликов Р.С. Сравнение точностей нелинейной фильтрации в расширенном фильтре Калмана и в ансамбле фильтров // Радиотехника. 2016. № 9. С. 135—140.
2. Шаврин В.В., Тисленко В.И., Лебедев В.Ю., Конаков А.С., Филимонов В.А., Кравец А.П. Квазиоптимальная оценка параметров сигналов ГНСС в режиме когерентного приема с использованием алгоритма сигма-точечного фильтра Калмана // Гироскопия и навигация. 2016. № 3 (94). С. 26—37.
3. Ge Q., Shao T., Chen S., Wen C. Carrier Tracking Estimation Analysis by Using the Extended Strong Tracking Filtering // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2017. Vol. 64. No. 2. DOI: 10.1109/TIE.2016.2610403.
4. Sudheesh P., Jayakumar M. Nonlinear tracking using unscented // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 678. P. 38—46. DOI: 10.1007/978-3-319-67934-1\_4.
5. Feng Y., Li X., Zhang X. An Adaptive Compensation Algorithm for Temperature Drift of Micro-Electro-Mechanical Systems Gyroscopes Using a Strong Tracking Kalman Filter // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 11222—11238. DOI: 10.3390/s150511222.
6. Mundla N., Samrat L.S., Nayak J. Adaptive sampling strong tracking scaled unscented Kalman filter for denoising the fibre optic gyroscope drift signal // IET Sci. Meas. Technol. 2015. Vol. 9. Iss. 3. P. 241—249. DOI: 10.1049/iet-smt.2014.0001.
7. Du Z., Li X. Strong Tracking Tobit Kalman Filter with Model Uncertainties // International Journal of Control Automation and Systems. 2019. Vol. 17 (1). DOI: 10.1007/s12555-017-0655-4.
8. Arghavani N., Almobaied M., Guzelkaya M., Eksin I. On-line rule weighting for PID-type fuzzy logic controllers using extended Kalman filter // IFAC-Papers On-Line. 2017. Vol. 50. Iss.1. P. 6946—6951. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1221.
9. Barragan A.J. A general methodology for online TS fuzzy modeling by the extended Kalman filter // Applied Soft Computing. 2014. Vol. 18. P. 277—289. DOI: 10.1016/j.asoc.2013.09.005.
10. Sasiadek J.Z., Wang Q., Zeremba M.B. Fuzzy adaptive Kalman filtering for INS/GPS data fusion / Proc. 15<sup>th</sup> IEEE Int. Symp. on Intelligent Control. 2000. P. 181—186. DOI: 10.1109/ISIC.2000.882920.
11. Mohammad T., Nader N., Mojtaba M. Adaptive fuzzy hybrid unscented/H-infinity filter for state estimation of nonlinear dynamics problems // Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2018. Vol. 41. DOI: 10.1177/0142331218787607.
12. Jwo D.J., Chung F.C. Fuzzy adaptive unscented Kalman filter for ultra-tight GPS/INS integration // IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Design. 2010. P. 229—235. DOI: 10.1109/ISCID.2010.148.
13. Pires D.S., Serra G.L. Methodology for Evolving Fuzzy Kalman Filter Identification // International Journal of Control, Automation and Systems. 2019. Vol. 17(3). P. 793—800. DOI: 10.1007/s12555-017-0503-6.
14. Feng Y., Li X., Zhang X. An Adaptive Compensation Algorithm for Temperature Drift of Micro-Electro-Mechanical Systems Gyroscopes Using a Strong Tracking Kalman Filter // Sensors. 2015. Vol. 15. P. 11222—11238. DOI: 10.3390/s150511222.
15. Hu G., Gao S., Zhong Y., Gao B., Subic A. Modified strong tracking unscented Kalman filter for nonlinear state estimation with process model uncertainty // Int. J. Adapt. Control Signal Process. 2015. Vol. 29. P. 1561—1577. DOI: 10.1002/acs.2572.
16. Li J., Song N., Yang G., Jiang R. Fuzzy adaptive strong tracking scaled unscented Kalman filter for initial alignment of large misalignment angles // Rev. Sci. Instrum. 2016. Vol. 87. DOI: 10.1063/1.4959561.
17. Jwo D.J., Yang C.F., Chuang C.H., Lee T.Y. Performance enhancement for ultra-tight GPS/INS integration using a fuzzy adaptive strong tracking unscented Kalman filter // Nonlinear Dyn. 2013. Vol. 73. P. 377—395. DOI 10.1007/s11071-013-0793-z.
18. Jwo D.J., Lai S.Y. Navigation integration using the fuzzy strong tracking unscented Kalman // Journal of Navigation. 2009. Vol. 62. P. 303—322. DOI: 10.1017/S037346330800516X.
19. Yazdkhasti S., Sasiadek J.Z., Ulrich S. Performance Enhancement for GPS/INS Fusion by Using a Fuzzy Adaptive Unscented Kalman Filter / 21<sup>st</sup> International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics. 2016. P. 1194—1199. DOI: 10.1109/MMAR.2016.7575308.
20. Hu G., Wang W., Zhong Y., Gao B., Gu C. A new direct filtering approach to INS/GNSS integration // Aerospace Science and Technology. 2018. Vol. 77. P. 755—764. DOI: 10.1016/j.ast.2018.03.040.
21. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ОАО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2009. 278 с.
22. Salychev O.S. Verified approaches to inertial navigation. М.: Bauman MSTU Press, 2017. 368 p.
23. Аль Битар Н., Гаврилов А.И. Сравнительный анализ алгоритмов комплексирования в слабосвязанной инерциально-спутниковой системе на основе обработки реальных данных // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 3 (106). С. 31—52.
24. Деменков Н.П., Чан М.Д. Оценка эффективности сильного следящего ансамблевого фильтра Калмана с применением нечёткой модели // Лесной вестник. 2019. Т. 23. № 4. С. 88—97.
25. Grigorie T.L., Lungu M., Edu I., Obreja R. Concepts for error modeling of miniature accelerometers used in inertial navigation systems // Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series. 2010. Vol. 34. P. 212—219.

**Ссылка для цитирования**

Чан Д.М. Разработка алгоритма настройки субоптимального коэффициента масштабирования в задаче фильтрации БИНС // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 329—334. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-6-329-334.

УДК 628.9:63

**О.Е. Железникова**, канд. техн. наук, доц.  
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),  
**А.Е. Куршев, С.Д. Богатырев**, канд. техн. наук, доц.  
(ОАО «Ардатовский светотехнический завод»),  
**С.А. Микаева**, д-р техн. наук  
(Российский технологический университет — МИРЭА, г. Москва)  
mikaeva@npo.lit.ru

## ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ФИТООБЛУЧАТЕЛЕЙ КОМБИНИРОВАННОГО СПЕКТРА НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ ОГУРЦА

*Представлены результаты влияния исследований излучения светодиодных фитооблучателей комбинированного спектра на рост и развитие растений огурца сорта «Лилипут F1». Дана оценка влияния спектральных составов фитооблучателей на основе светодиодов на рост и развитие растений огурца данного сорта. Проведённые исследования (первая вегетация) позволили предварительно выявить наиболее благоприятный спектр излучения, обеспечивающий лучшие биометрические характеристики и продуктивность растений огурца сорта «Лилипут F1».*

**Ключевые слова:** светодиод; фитооблучатель; экспериментальная исследовательская гидропонная установка; спектр; светокультура; огурец.

*The researches results of the radiation influence from LED phyto-irradiators of the combined spectrum on the growth and development of cucumber plants of the kind «Liliput F1» are presented. The influence evaluation of the phyto-irradiators spectral compositions based on LEDs on the growth and development of this kind cucumber plants is given. The conducted researches (the first vegetation) allow to previously identifying the most favorable radiation spectrum, which provides the best biometric characteristics and productivity of plants of the “Liliput F1” cucumber.*

**Keywords:** LED; phyto-irradiator; experimental research hydroponic installation; range; light culture; cucumber.

Интенсивное развитие светодиодных технологий и снижение их стоимости способствуют активному внедрению высокоэффективных фитооблучателей и развитию технологического освещения в сооружениях агропромышленного комплекса. Именно на основе светодиодов (СД) в настоящее время возможно создание фитооблучателей со спектром, необходимым для конкретной культуры. Фитооблучатели на основе светодиодов как квазимонохроматические излучатели в основных диапазонах области фотосинтетически активной радиации (ФАР), определяющие формирование биомассы, морфогенез и метаболизм растений, стимулируют фотобиологические исследования в современном мире [1—5].

Последние исследования [6] показывают, что реакция растений (их продуктивность) неаддитивно зависит от спектрального состава и облучённости, а поиски универсальных спектров воздействия на продуктивность растений бесперспективны. То есть альтернативы экспериментальным методам оптимизации параметров для светокультуры растений пока не существует.

В условиях импортозамещения сельскохозяйственной продукции, выращиваемой в теплицах, как в промышленных масштабах, так и в подсобных и фермерских хозяйствах актуальными являются разработка и создание высокоэффективных фитооблучателей различной мощности на основе энергоэффективных светодиодов с оптимальным спектром фитооблучения для таких овощных культур, как томаты и огурцы в различные вегетационные периоды [7].

При использовании светодиодных фитооблучателей возможно повышение эффективности поглощения световой энергии выращиваемыми растениями, что позволит сократить длительность периода вегетации до начала плодоношения, увеличить продуктивность самих растений, а также повысить товарные качества продукции [8—10].

Цель настоящей работы — исследовать влияние излучения светодиодных фитооблучателей комбинированного спектра на рост и развитие растения огурца сорта «Лилипут F1». Для экспериментальных исследований был взят огурец раннего срока созревания сорта «Лилипут F1», который отличается высокими



вкусовыми качествами, универсальностью использования, высокой урожайностью и резистентностью ко многим заболеваниям. Огурцы сорта «Лилипут F1» характеризуются средней ветвистостью и склонностью к образованию боковых детерминантных побегов, куст формируется самостоятельно. Плоды цилиндрической формы длиной 7...9 см, массой 80 ... 90 г.

Исследования проводили в лаборатории искусственного климата ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва», г. Саранск, на экспериментальной исследовательской гидропонной установке (ЭИГУ) со светодиодными фитооблучателями комбинированного спектра. Принципиальным отличием таких облучателей является применение в них светодиодных композиций на основе белых и цветных светодиодов, позволяющих изменять в широких пределах их спектральные характеристики в области фотосинтетически активной радиации (ФАР). Фитооблучатели изготовлены ОАО «Ардатовский светотехнический завод».

ЭИГУ состоит из трёх секций, разделённых между собой светонепроницаемыми ширмами, с возможностью общего для секций регулирования температуры и влажности в заданных диапазонах. На рис. 1 показана одна из трёх секций ЭИГУ с площадью технологической зоны 0,91 м<sup>2</sup>. В процессе эксперимента поддерживался одинаковый уровень фотонной облучённости  $250 \pm 10$  мкмоль/(с·м<sup>2</sup>) над верхушками растений за счёт изменения высоты подвеса фитооблучателей.

В первой секции использовались два фитооблучателя (ФО1) с натриевой лампой высокого давления типа ДНаТ (дуговая натриевая трубчатая). Спектр излучения ФО1 представлен на рис. 2.

Растения огурца во второй секции облучались двумя фитооблучателями (ФО2) со СД типов GW CSSRM2.PM с цветовой температурой  $T_{\text{цв}} = 5000$  К и FM-P3528WNS-460W-R80 с  $T_{\text{цв}} = 6500$  К, имеющими сплошной спектр, и СД типов 2ТОЗХ5FXX000301 и 2ТОЗХ5EXX000301 с пиковыми длинами волн 660 и 730 нм соответственно (рис. 3).

В третьей секции ЭИГУ использованы фитооблучатели (ФО3) со СД типа GW CSSRM2.PM с  $T_{\text{цв}} = 5000$  К, имеющими сплошной спектр, и СД типа



Рис. 1. Экспериментальная исследовательская гидропонная установка

2ТОЗХ5FXX000301 с пиковой длиной волны 660 нм. Спектр излучения фитооблучателя ФО3 представлен на рис. 4.

Измерения спектральных характеристик фитооблучателей проводились спектрорадиометром Specbos 1211 (Jetty, Германия), уровня облучённости — спектрометром МК 350S (UPRtek, Тайвань). Неравномерность распределения облучённости технологической зоны во всех секциях не превышала 15 %.

Эксперименты (первая вегетация) проводились при постоянном (16 ч) фотопериоде и температуре воздуха +22...24 °С. В качестве субстрата использовали минеральную вату, питательный раствор готовился с добавлением минеральных удобрений:  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{KNO}_3$  и комплексного удобрения «Микровит».

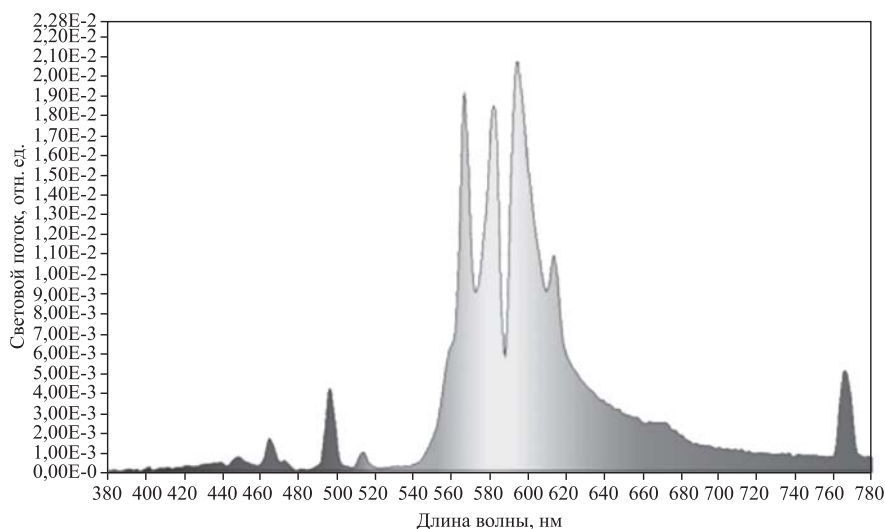


Рис. 2. Спектр излучения фитооблучателя ФО1

Концентрацию  $E_c$  питательного раствора удобрений поддерживали в пределах, обеспечивающих проводимость почвы 1,8...2,3 м·См/см, уровень рН = 5,5...5,8, влажность — 70 %.

Фенологические учёты и наблюдения за ростом и развитием растений проводились каждые 5 сут. Фиксировались высота растений, площадь самого большого листа, число листьев, диаметр стебля, число плетей и др. Регулярные наблюдения за рассадой огурцов были начаты в возрасте 15 сут.

В табл. 1 показана динамика роста растений огурца сорта «Лилипут F1».

Анализ данных табл. 1 позволил заключить следующее: с самого начала облучения выявлена разница в размерах и качестве рассады огурцов при различных вариантах облучения. Растения огурца в течение 25...35 суток под фитооблучателями Ф03 существенно отставали в росте: по отношению к рассаде под фитооблучателями Ф01 — на 33...47 %, под облучателями Ф02 — на 29,5...20,9 %. К возрасту рассады в 40...45 суток ситуация изменилась: высота рассады огурца под фитооблучателями Ф03 даже незначительно (в среднем на 1,5 %) превысила высоту растений под фитооблучателями Ф01.

Биометрические показатели растений огурца сорта «Лилипут F1» представлены в табл. 2. На 50-й день высота растений огурца под Ф02 превышала высоту растений под Ф01 и Ф03 на 14,5 и 13,6 % при превышении сырой массы на 4,2 и 9,4 % соответственно. Следовательно, спектральный состав облучения меньше влияет на продуктивность фотосинтеза, чем на его рост, что отмечается и в [11].

Оценку содержания хлорофилла в листьях проводили на спектрофотометре UV-Mini-1240 (табл. 3).

Листья растений огурца под облучателем Ф02 были насыщенного зелёного цвета, что

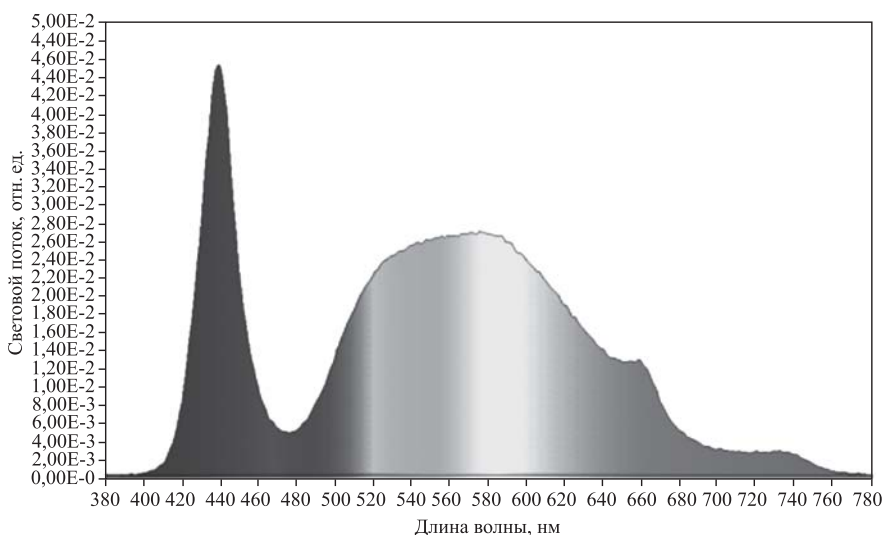


Рис. 3. Спектр излучения фитооблучателя Ф02

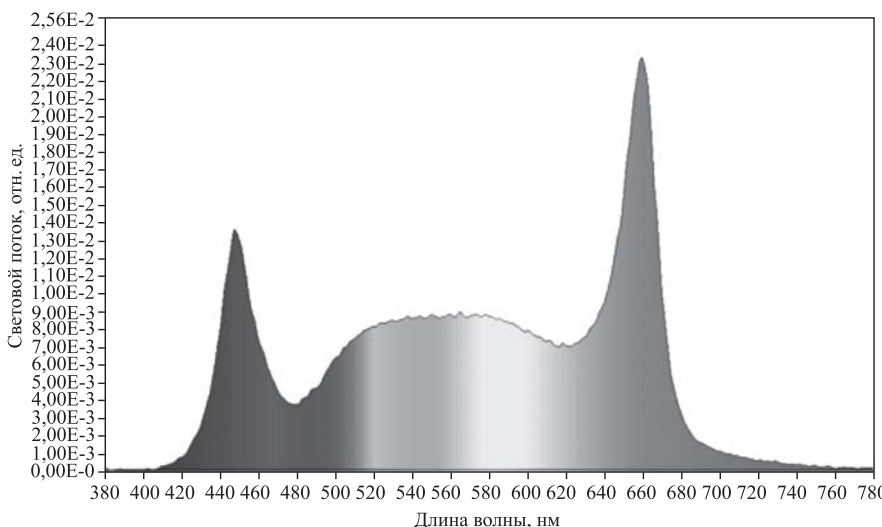


Рис. 4. Спектр излучения фитооблучателя Ф03

Таблица 1  
Динамика роста растений огурца сорта «Лилипут F1», см

Варианты облучения	Возраст растений огурцов, сутки					
	25	30	35	40	45	50
Ф01	20,3 ± 1,4	38,7 ± 1,9	48,6 ± 2,2	52,6 ± 2,4	53,3 ± 2,0	58,6 ± 2,1
Ф02	19,3 ± 1,3	46,3 ± 1,7	58,6 ± 1,6	62,3 ± 1,8	66,3 ± 1,5	68,6 ± 2,0
Ф03	13,6 ± 1,2	34,3 ± 1,4	46,3 ± 1,9	51,6 ± 1,8	54,3 ± 1,9	59,3 ± 1,9

объясняется повышенным содержанием хлорофилла. Концентрация хлорофиллов а и в в листьях растений огурца под облучателем Ф02 была в 1,3 раза выше, чем под Ф01 и в 3,36 раза выше, чем под Ф03.

Проведённые фотобиологические исследования (первая вегетация) позволили пред-

Таблица 2

**Биометрические показатели растений огурца сорта «Лилипут F1» на 50-й день**

Показатель	Вариант облучения		
	ФО1	ФО2	ФО3
Высота растения, см	58,66 ± 6,2	68,66 ± 7,1	59,3 ± 6,3
Число листьев, шт.	16,0 ± 1,3	18,0 ± 1,2	16,7 ± 1,1
Площадь самого большого листа, см <sup>2</sup>	120,0 ± 7,1	121,2 ± 7,4	120,8 ± 6,9
Сырая масса растения, г	46,0 ± 2,7	48,0 ± 2,8	43,5 ± 2,5

Таблица 3

**Содержание хлорофилла в листьях 50-дневных растений огурца сорта «Лилипут F1»**

Вариант облучения	Концентрация пигментов, мг/л			Содержание пигмента на сырую массу, мг/г
	Хлорофилл а	Хлорофилл b	Сумма хлорофиллов a + b	
ФО1	17,79 ± 0,7	14,58 ± 0,4	25,7 ± 1,1	1,71 ± 0,1
ФО2	18,86 ± 0,8	18,89 ± 0,5	33,6 ± 1,0	2,24 ± 0,2
ФО3	6,53 ± 0,3	3,46 ± 0,3	10,0 ± 0,9	0,67 ± 0,1

варительно выявить наиболее благоприятный спектр излучения, обеспечивающий лучшие биометрические характеристики и продуктивность растений огурца сорта «Лилипут F1» при его выращивании по технологии светокультуры, что можно объяснить наличием в спектре фитооблучателя ФО2 излучения с длиной волны  $\lambda = 730$  нм, т. е. излучения за пределами ФАР, которое не используется и не оказывает на растения энергетического воздействия, но, возбуждая активную форму растительного пигмента фитохрома  $\Phi_{730}$ , регулирует фотоморфогенез растения. Влияние спектрального диапазона (700...780 нм) на рост и развитие растений в настоящее время исследуется, что делает желательным его наличие в спектре излучения фитооблучателя [12, 13].

Реализация результатов проведенных исследований даст возможность организовать производство на ОАО «Ардатовский светотехнический завод» уникальных фитооблучателей на основе светодиодов, спектральная плотность потока излучения которых максимально учитывает «предпочтения» таких овощных культур, как огурцы в различные вегетационные периоды.

**Библиографические ссылки**

1. Прикупец Л.Б. Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России // Светотехника. 2017. № 6. С. 6—4.
2. Kurshev A.E., Bogatyrev S.D., Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V. Highly efficient phytoradiator development for plant photoculture based on combined spectrum // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019. No. 8 (3). P. 392—394.
3. Пчелин В.М., Макарова И.Е. Оценка состояния и перспектив развития систем облучения в современных тепличных комплексах // Светотехника. 2018. № 1. С. 23—27.
4. Lin K.H., Huang M.Y., Hsu M.H., Yang Z.W., Yang C.M. The effects of red, blue and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata) // Scientia Horticulturae. 2013. No. 150. P. 86—91.
5. Nanya K., Ishigami Y., Hikosaka S., Goto E. Effects of blue and red light on stem elongation and of tomato seedlings // Acta Horticulturae. 2012. No. 956. P. 261—266.
6. Прикупец Л.Б., Боос Г.В., Терехов В.Г., Тараканов И.Г. Исследование влияния излучения в различных диапазонах области ФАР на продуктивность и биохимический состав биомассы салатно-зеленых культур // Светотехника. 2018. № 5. С. 6—12.
7. Smallwood P. Tracking the Horticultural SSL Market and Technology // Horticultural Lighting Conference. 2017. P. 80—86.
8. Микаева С.А., Микаева А.С. Экспериментальное исследование характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. С. 150.
9. Микаева С.А. Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. С. 135.
10. Микаева С.А., Микаева А.С. Современные электронные системы и устройства. М.: Русайнс, 2019. С. 186.
11. Ракутько С.А., Ракутько Е.Н., Васькин А.Н. Влияние соотношения красного и дальнекрасного излучения на рост и развитие рассады томата (*SOLANUM LYCOPERSICUM*) // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 8. P. 136—140.
12. Терехов В.Г. Система облучения для автоматизированной многоярусной фитоустановки типа «City Farm» // Светотехника. 2019. № 5. P. 59—63.
13. Bugbee B. Towards an optimal spectral quality for plant growth and development: The importance of radiation capture // ActaHortic. 2016. No. 1134(1) P. 1—12.

**Ссылка для цитирования**

Железникова О.Е., Куршев А.Е., Богатырев С.Д., Микаева С.А. Влияние излучения светодиодных фитооблучателей комбинированного спектра на рост и развитие растений огурца // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 335—338.



Ю.И. Мышляев, канд. техн. наук, В.О. Минкин, А.В. Фиошин, канд. техн. наук  
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал)

earlov@gmail.com

## УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ПРИВОДОМ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

*Предложена методика адаптивного управления колебаниями каскадными системами на основе энергетического подхода и метода скоростного биградиента с настраиваемой моделью. Целями управления являются ограниченность всех траекторий замкнутой системы и возбуждение в механической подсистеме колебаний с заданным уровнем энергии, а также идентификация неизвестных параметров механической подсистемы. Приведены пример и результаты компьютерного моделирования.*

**Ключевые слова:** метод скоростного биградиента; каскадная система; адаптивное управление; функция Ляпунова; алгоритм скоростного градиента.

*A method for adaptive control of oscillations by cascade systems based on the energy approach and the method of high-speed big-gradient with an adjustable model is proposed. The control objectives are all trajectories limitation of a closed system and the excitation in the mechanical subsystem of oscillations with a given energy level, as well as the identification of unknown parameters for the mechanical subsystem. An example and results of computer simulation are given.*

**Keywords:** high-speed big-gradient method; cascade system; adaptive management; Lyapunov function; speed gradient algorithm.

**Введение.** Задачи адаптивного управления нелинейными колебаниями возникают во многих приложениях, например, при возбуждении колебаний с заданными характеристиками и стабилизации неустойчивого положения маятника или систем со схожей динамикой (перевёрнутый маятник на тележке, самолёт, модель опрокидывающего автомобиля и т. д.).

Особый интерес в задачах управления колебаниями представляет возможность существенных изменений свойств системы с помощью малых управляющих воздействий. Свойство «минимального вмешательства» в ход естественных процессов [1, 2] обеспечивается за счёт использования подхода, основанного на введении энергетической целевой функции, т. е. рассмотрения задачи устойчивости по отношению к функции.

В задачах управления колебаниями часто динамика привода оказывает существенное влияние на качество управления. Поэтому ставится задача синтеза управления колебаниями не просто механической системой, а каскадной системой, состоящей из привода и механической подсистемы. При этом требуется обеспечить замкнутой системе ограниченность всех траекторий и желаемую динамику по части переменных состояния (конечного каскада) в условиях параметрической неопределённости. Это вызывает наибольшую сложность, так

как энергия системы и, как следствие, целевая функция зависят от неизвестных параметров.

Для решения задач управления каскадными системами в условиях параметрической неопределённости Ю.И. Мышляев в 1999 г. [3] предложил метод настраиваемого скользящего режима (НСР), сочетающий в себе адаптацию неизвестных параметров алгоритмом скоростного градиента и скользящий режим с настраиваемым многообразием, формируемым на основе оценок настраиваемых параметров. В дальнейшем метод НСР был дополнен классом гладких алгоритмов управления с настраиваемыми пересечениями гиперповерхностей, обобщён в классе нелинейных, нестационарных, последовательно соединённых двух подсистем управления и стал называться методом скоростного биградиента (МСБГ) [4–7]. МСБГ применим для синтеза алгоритмов управления с целевой функцией, не зависящей от параметров объекта управления (ОУ).

Решение задачи адаптивного управления колебаниями нелинейных каскадных систем также предлагал Д.В. Ефимов [8]. В отличие от МСБГ, для обхода входного каскада он применял алгоритмы, основанные на бэкстеппинге, что приводит к необходимости вычисления производной от виртуального управления. Для адаптации неизвестных параметров использу-

ется адаптивный наблюдатель. Доказательство работоспособности алгоритма управления приводится методом функции Ляпунова.

**Постановка задачи.** Рассмотрим каскадный аффинный объект с выходной подсистемой  $S_1$  в гамильтоновой форме и входной подсистемой  $S_2$  — динамическим исполнительным механизмом в виде интеграторов:

$$S_1 : \dot{q}_i = \frac{\partial H(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \xi)}{\partial p_i}, \dot{p}_i = -\frac{\partial H(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \xi)}{\partial q_i}, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, h, h = (n - m)/2;$$

$$S_1 : \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{u}, \quad (2)$$

где  $H(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \xi) = H_0(\mathbf{x}_1, \xi) + \mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1, \xi)^T \mathbf{x}_2$  — гамильтониан;  $H_0(\mathbf{x}_1, \xi)$  — гамильтониан (энергия) свободной консервативной системы;  $\mathbf{H}_1(\mathbf{x}_1, \xi)$  — гамильтониан взаимодействия;  $\mathbf{x}_1 = \text{col}\{\mathbf{q}, \mathbf{p}\} \in \mathbb{R}^{n-m}$ ,  $\mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{q} = \text{col}\{q_1, \dots, q_h\}$ ,  $\mathbf{p} = \text{col}\{p_1, \dots, p_h\}$ , — обобщённые координаты и импульсы,  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$ .

Требуется синтезировать алгоритм адаптивного управления  $\mathbf{u}$ , обеспечивающий ограниченность всех траекторий замкнутой системы и возбуждение в гамильтоновой подсистеме колебаний с заданным уровнем энергии  $H_*$ . Введём целевой функционал (ЦФ):

$$Q(\mathbf{x}_1, \xi) = 0,5[H_0(\mathbf{x}_1, \xi) - H_*]^2. \quad (3)$$

Тогда цель управления (ЦУ) для конечного каскада можно представить в виде

$$Q(\mathbf{x}_1, \xi) \leq \Delta_{x_1} \text{ при } t \geq t_*, \quad (4)$$

где  $\Delta_{x_1} > 0$  — заданная точность;  $t_*$  — время достижения ЦУ.

**Методика синтеза.** ЦФ (4) зависит от неизвестных параметров, поэтому МСБГ непосредственно не применим. Рассмотрим подробнее подход, позволяющий синтезировать алгоритмы управления. Он заключается в модификации МСБГ путём введения настраиваемой модели (НМ) конечного каскада для адаптации параметров виртуального управления.

Исходная задача разделена на две независимые подзадачи:

1) синтез алгоритма управления  $\mathbf{u}^*$  каскадной системой (1) и (2) в предположении, что параметры объекта известны;

2) синтез контура адаптации для параметров выходного каскада (1).

Получаемые в процессе адаптации параметры используются для формирования управления системой.

Рассмотрим подзадачи более детально.

**Подзадача 1.** Синтез управления  $\mathbf{u}^*$  системой (1) и (2) в предположении, что параметры объекта известны.

Введём «идеальное» отклонение от пересечения многообразий  $\sigma^*$ :

$$\sigma^* = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2\text{virt}}^*. \quad (5)$$

Синтезируем «идеальное» виртуальное управление выходным каскадом  $\mathbf{x}_{2\text{virt}}^* = \mathbf{x}_{2\text{virt}}(\mathbf{x}_1, \xi)$  в виде алгоритма скоростного градиента (АСГ) в конечной форме:

$$\dot{\mathbf{x}}_{2\text{virt}}(\mathbf{x}_1, \xi) = -\gamma_x \nabla_{\mathbf{x}_{2\text{virt}}^*} w(\mathbf{x}_1, \xi, \sigma^*), \gamma_x > 0, \quad (6)$$

где  $w(\mathbf{x}_1, \xi, \sigma^*) = (H_0 - H_*)[H_0, \mathbf{H}_1]^T (\mathbf{x}_{2\text{virt}}^* + \sigma^*)$ ,  $[H_0, \mathbf{H}_1]$  — скобка Пуассона.

Синтезируем «идеальное» управление  $\mathbf{u}^*$ , обеспечивающее достижение многообразия  $\sigma^* = 0$ :

$$\mathbf{u}^* = -\gamma_m \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \sigma^*), \quad (7)$$

где вектор-функция  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \sigma^*)$  имеет вид  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \sigma) = \text{sing} \nabla_{\mathbf{u}} \mu(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\sigma}, \mathbf{u}) = \text{sing} [\mathbf{g}_2^T(\mathbf{x}, \xi) \boldsymbol{\sigma}]$  или  $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, \sigma) = \nabla_{\mathbf{u}} \mu(\boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\sigma}, \mathbf{u}) = \mathbf{g}_2^T(\mathbf{x}, \xi) \boldsymbol{\sigma}$  при  $\mathbf{g}_2(\mathbf{x}, \xi) = \mathbf{I}$ .

**Теорема 1.** Рассмотрим систему (1), (2), (5), (6) и (7). Все траектории системы ограничены, достигаются ЦУ (4) и  $R(\boldsymbol{\sigma}) \leq \Delta_\sigma$  при  $t \geq \tilde{t}_*$ ,  $\Delta_\sigma > 0$ , с  $R(\boldsymbol{\sigma}^*) = 0,5\boldsymbol{\sigma}^{*T} \boldsymbol{\sigma}^*$ . Для системы существует функция Ляпунова:  $V_1 = Q(\mathbf{x}_1, \xi) + R(\boldsymbol{\sigma}^*)$ .

Доказательство теоремы проведено методом функции Ляпунова с использованием леммы Барбалата и леммы об аттрактивности (Ла-Салля).

**Подзадача 2.** Синтез контура адаптации для параметров выходного каскада (1) с ограниченным входом  $\mathbf{x}_2$ .

Введём дополнительную цель управления (ДЦУ) — идентификацию параметров объекта управления:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\xi} = \xi, \quad (8)$$

где  $\hat{\xi}$  — вектор настраиваемых параметров.

Введём в рассмотрение НМ:

$$\dot{\mathbf{x}}_{1*} = \mathbf{v}, \quad (9)$$

где  $\mathbf{x}_{1*} \in \mathbb{R}^{n-m}$  — вектор состояния настраиваемой модели;  $\mathbf{v} = \mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \hat{\xi})$  — входное управляющее воздействие настраиваемой модели,  $\mathbf{e} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1*}$ .

Сформулируем ДЦУ по отношению к синтезу входного управляющего воздействия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q_e[\mathbf{e}(t)] \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow \infty, \quad (10)$$

где локальный целевой функционал имеет вид

$$Q_e(\mathbf{e}) = 0, 5\mathbf{e}^T \mathbf{P}\mathbf{e}, \mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0. \quad (11)$$

ЦФ (11) не зависит от неизвестных параметров. На основе МСБГ получаем алгоритм входа вида (10) с гурвицевой матрицей  $\mathbf{A}^*$  и законом адаптации (11):

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \hat{\xi}) = \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i} - \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} - \mathbf{A}^* \mathbf{e}; \quad (12)$$

$$\dot{\hat{\xi}} = \Gamma \nabla_{\hat{\xi}} \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i} - \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} \mathbf{P}\mathbf{e}, \quad (13)$$

$$\Gamma = \Gamma^T > 0.$$

*Условие идентифицируемости I.* Вектор-функция  $\Phi = \nabla_{\hat{\xi}} \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i} - \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \hat{\xi}, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\}$  — интегрально невырожденная.

*Теорема 2.* Пусть выполнено условие I. В системе (1), (9), (12), (13) достигаются ЦУ (8) и (10) и существует функция Ляпунова  $V_2 = Q_e + \|\hat{\xi} - \xi\|_{\Gamma^{-1}}$ .

Доказательство теоремы проведено методом функции Ляпунова с использованием леммы Барбалата.

*Подзадача 3.* Объединены результаты подзадач 1 и 2. Получаемые в процессе адаптации оценки параметров будем использовать для формирования виртуального управления вида (6):

$$\mathbf{x}_{2\text{virt}}(\mathbf{x}_1, \hat{\xi}) = -\gamma_x \nabla_{\mathbf{x}_2} \dot{Q}(\mathbf{x}_1, \xi) \quad (14)$$

и управления

$$\mathbf{u} = -\gamma_m \Phi(\mathbf{x}, \sigma), \gamma_m > 0, \quad (15)$$

где

$$\sigma = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_{2\text{virt}}(\mathbf{z}, \theta), \quad (16)$$

гарантирующего достижение ЦУ  $R(\sigma) \leq \Delta_\sigma$  при  $t \geq \tilde{t}_*$ ,  $\Delta_\sigma > 0$ .

*Утверждение.* Рассмотрим систему (1), (2), (9), (12)—(16), представленную на рис. 1. Пусть выполнены условия теорем 1 и 2. Тогда все траектории системы ограничены и достигаются ЦУ  $R(\sigma) \leq \Delta_\sigma$  при  $t \geq \tilde{t}_*$ ,  $\Delta_\sigma > 0$ , (4), (8) и (10).

**Управление колебаниями маятника с приводом.** Покажем применение предложенной методики для синтеза алгоритма возбуждения колебаний системы «мотор-маятник» (ММ) с идентификацией параметров лабораторного стенда, представленного на рис. 2—4 [9].

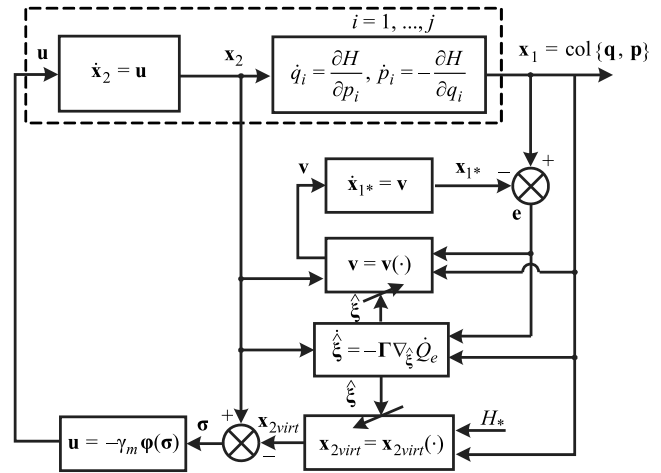


Рис. 1. Структурная схема системы управления гамильтоновой системой

Маятник (см. рис. 4) отклоняется на определённый угол при подаче на двигатель напряжения. Напряжение подаётся от регулируемого источника напряжения (см. рис. 2). Для считывания информации о положении маятника в конструкции стенда предусмотрен энкодер (см. рис. 3). Для регулирования напряжения на двигателе используется ШИМ-сигнал, реализованный посредством электронной платы с микроконтроллером ATmega128 семейства AVR, соединённой

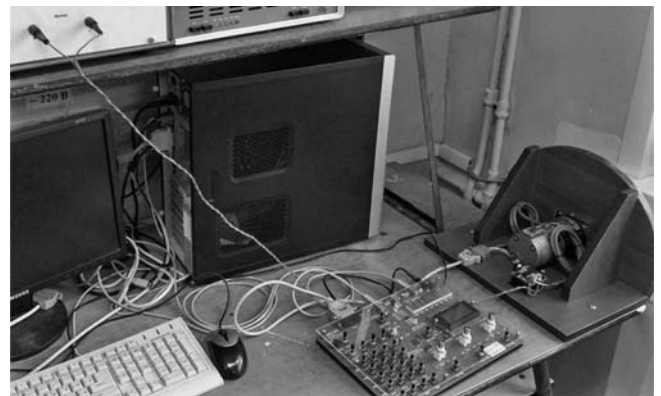


Рис. 2. Лабораторный стенд «мотор-маятник»

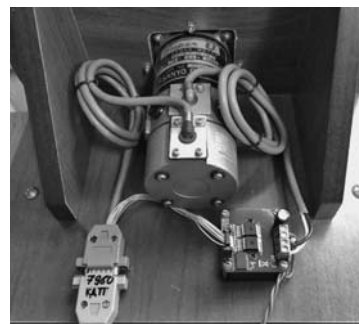


Рис. 3. Плата управления и двигатель ММ



Рис. 4. Мотор-маятник (вид спереди)



с персональным компьютером (ПК) (см. рис. 5). Для определения параметров двигателя и составления его модели были проведены эксперименты по снятию его характеристик.

Частота ШИМ-сигнала изменялась в диапазоне 28,125...3600 Гц. Данные об отклонении

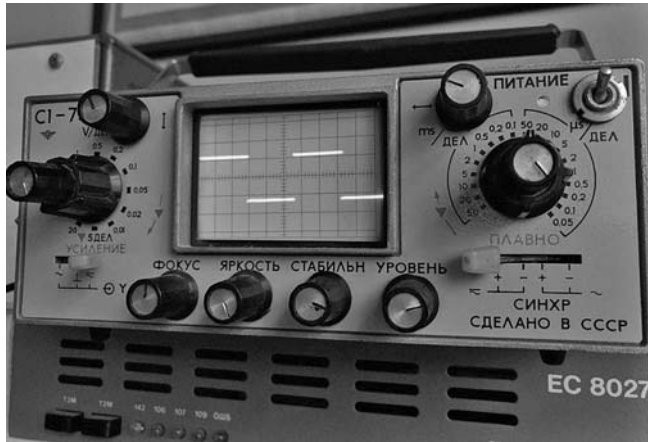


Рис. 5. Измерение коэффициента заполнения сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ)

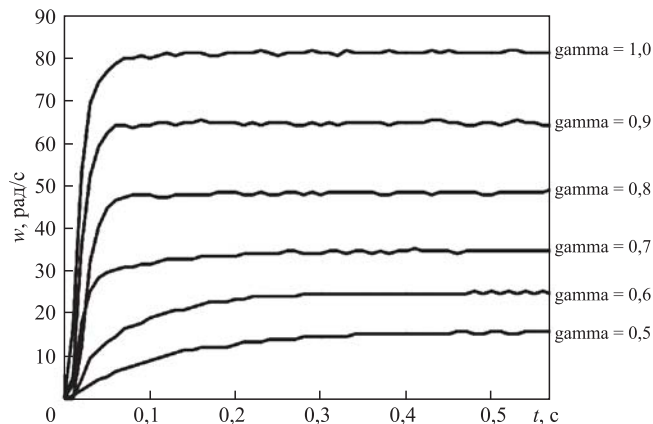


Рис. 6. Зависимость скорости вращения ДПТ от времени при разных коэффициентах заполнения ШИМ

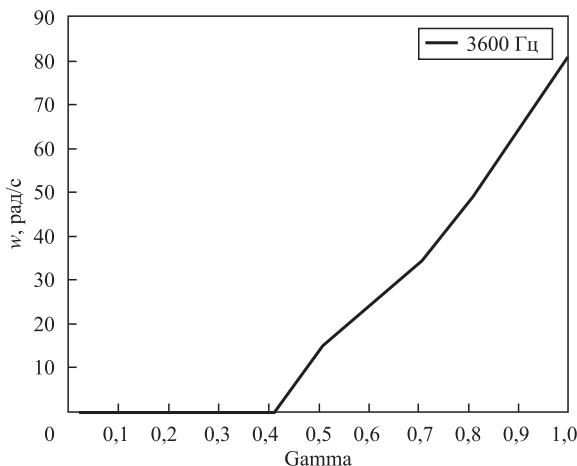


Рис. 7. Зависимость скорости вращения ДПТ от коэффициента заполнения при частоте ШИМ 3600 Гц

маятника от положения передаются в реальном времени в пакет MatLab посредством таймера, реализованного в микроконтроллере. Результаты испытаний представлены на рис. 6 и 7.

Для дальнейших экспериментов была выбрана частота ШИМ 3600 Гц, так как в этом случае зависимость частоты вращения двигателя постоянного тока (ДПТ) от коэффициента заполнения ШИМ наиболее линейна (см. рис. 7).

**Постановка задачи управления энергией маятника.** Рассмотрим модель маятника в нормальной форме Коши:

$$S_1 : \begin{cases} \dot{q} = p; \\ \dot{p} = -\xi_1 \sin q - \xi_3 p + \xi_2 x_2. \end{cases} \quad (17)$$

Не уменьшая общности, будем считать, что модель двигателя описывается апериодическим звеном

$$S_2 : \dot{x}_2 = -ax_2 + ku, \quad (18)$$

где  $x_1 = [q \ p]^T$  — вектор состояния маятника;  $\xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3]^T$  — вектор неизвестных параметров объекта управления;  $k > 0$  — параметр двигателя.

Для маятника  $H_0(x_1, \xi) = p^2/2 + \xi_1(1 - \cos q)$  — гамильтониан свободной системы (полная механическая энергия),  $H_1(x_1, \xi) = -\xi_2 q$  — гамильтониан взаимодействия. Очевидно, что неизвестные параметры входят в слагаемые гамильтониана линейно.

ЦУ: ограниченность всех траекторий замкнутой системы и возбуждение в гамильтоновой подсистеме колебаний с заданным уровнем энергии  $H_* \ Q(x_1, \xi) \leq \Delta_{x_1}$  при  $t \geq t_*$ . Дополнительной целью управления является идентификация параметров маятника  $\lim_{t \rightarrow \infty} \xi = \xi$ , где  $\xi$  — вектор настраиваемых параметров.

Применим предложенную методику к синтезу алгоритма управления методом скоростного биградиента с настраиваемой моделью.

**Этап 1.** Введём желаемое многообразие  $x_2 = x_{2virt}$ , где  $x_{2virt}$  — виртуальное управление маятником, и отклонение от многообразия в форме

$$\sigma = x_2 - x_{2virt}. \quad (19)$$

Синтезируем «идеальное» виртуальное управление в форме (6) с компенсацией момента трения:

$$x_{2virt}^* = -\gamma_x \{ [H_0(x_1, \xi) - H_*] p \} + \frac{\xi_3}{\xi_2} p. \quad (20)$$

Введение в управление (20) слагаемого  $\frac{\xi_3}{\xi_2} p$  позволяет применять для диссипативной системы (17) алгоритмы управления консервативными системами.

Найдём производную ЦФ (4) в силу системы (17):

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= w(\mathbf{x}_1, \xi) = (H_0 - H_*) \left( \frac{\partial H_0}{\partial q} \dot{q} + \frac{\partial H_0}{\partial p} \dot{p} \right) = \\ &= (H_0 - H_*) p (-\xi_3 p + \xi_2 x_{2virt}^*) = \\ &= -\gamma_x (H_0 - H_*)^2 \xi_2 p^2 \leq 0. \end{aligned}$$

Следовательно, ЦУ (4) достигается на основании леммы Ла-Салля.

*Этап 2.* Так как неизвестные параметры входят только во второе уравнение системы (17), размерность НМ (9) может быть уменьшена, так как неизвестные параметры входят не во все уравнения пространства состояния системы:

$$\dot{p}^* = v. \tag{21}$$

Введём ЦФ вида  $Q_e(\mathbf{e}) = 0,5\mathbf{e}^T \mathbf{P} \mathbf{e}$ ,  $\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > 0$ :

$$Q_e(\mathbf{e}) = 0,5e^2, \tag{22}$$

где  $\mathbf{e} = p - p^*$ .

*Этап 2.1.* Выберем «идеальное» управление НМ (21) вида

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{v}(\mathbf{x}_1, \mathbf{e}, \mathbf{x}_2, \xi) = \\ &= \text{col} \left\{ \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i} - \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right\} - \mathbf{A}_* \mathbf{e}: \\ v_* &= -\alpha_* e - \xi_1 \sin q - \xi_3 p + \xi_2 x_2, \alpha_* < 0. \end{aligned} \tag{23}$$

Найдём производную ЦФ (22) в силу уравнения ошибки:

$$\begin{aligned} w_e(\mathbf{x}_1, x_2, \xi) &= e[-\xi_1 \sin q - \xi_3 p + \xi_2 x_2 - \\ &- (-\alpha_* e - \xi_1 \sin q - \xi_3 p + \xi_2 x_2)] = \\ &= \alpha_* e^2 \leq -\rho_e Q_e, \end{aligned}$$

где  $\rho_e = -2\alpha_*$ .

*Этап 2.2.* Заменяем в выражении (23) и неизвестные параметры  $\xi$  настраиваемыми  $\hat{\xi}$ :

$$v = -\alpha_* e - \hat{\xi}_1 \sin q - \hat{\xi}_3 p + \hat{\xi}_2 x_2. \tag{24}$$

Выберем алгоритм адаптации неизвестных параметров в форме

$$\dot{\hat{\xi}} = \Gamma \nabla_{\hat{\xi}} \text{col} \left( \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial p_i} - \frac{\partial H(\mathbf{q}, \mathbf{p}, \xi, \mathbf{x}_2)}{\partial q_i} \right) \mathbf{P} \mathbf{e}.$$

Вычисляя последовательно  $w_e(\mathbf{x}_1, x_2, \hat{\xi})$  и градиенты от  $w_e(\mathbf{x}_1, x_2, \hat{\xi})$  по настраиваемым параметрам, получаем алгоритмы адаптации:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{\xi}}_1 &= -\gamma_1 e \sin q; \\ \dot{\hat{\xi}}_2 &= \gamma_2 e x_2; \\ \dot{\hat{\xi}}_3 &= -\gamma_3 e p, \end{aligned} \tag{25}$$

где  $\gamma_k > 0, k = 1...3$ .

Используя получаемые в ходе адаптации оценки параметров для формирования виртуального управления, получим выражение для виртуального управления вида  $\mathbf{x}_{2virt}(\mathbf{x}_1, \hat{\xi}) = -\gamma_x \nabla_{\mathbf{x}_{2virt}} w(\mathbf{x}_1, \hat{\xi}, \sigma)$ :

$$x_{2virt} = -\gamma_x \{ [H_0(\mathbf{x}_1, \hat{\xi}) - H_*] p \} + \frac{\gamma_x \sqrt{3}}{\xi_2} p. \tag{26}$$

Введём ограничение на контур адаптации  $\hat{\xi}_2(t) > \xi_{20}, \xi_{20} > 0$  — минимально возможное значение параметра  $\xi_2$  для конкретного объекта.

*Этап 3.* Введём ЦФ вида  $R(\sigma) = 0,5\sigma^T \sigma$ :

$$R(\sigma) = 0,5\sigma^2. \tag{27}$$

Управление, гарантирующее достижение ЦУ  $R(\sigma) \leq \Delta_\sigma$  при  $t \geq \tilde{t}_*$ , выбирается в форме  $\mathbf{u} = -\gamma_m \Phi(\mathbf{x}, \sigma)$ :

$$u = -\gamma_m \sigma, \tag{28}$$

или

$$u = -\gamma_m \text{sign} \sigma. \tag{29}$$

Как видно из выражений (27) и (28), управление не зависит от параметров привода.

Для придания системе идентифицирующих свойств, эталонный уровень энергии выбран в виде гармонической функции  $H_*(t) = 0,1(1 + \sin 10t)$ .

Результаты натурных испытаний системы (17)—(19), (21), (24)—(26), (29) представлены на рис. 8—10. Значения параметров, полученных

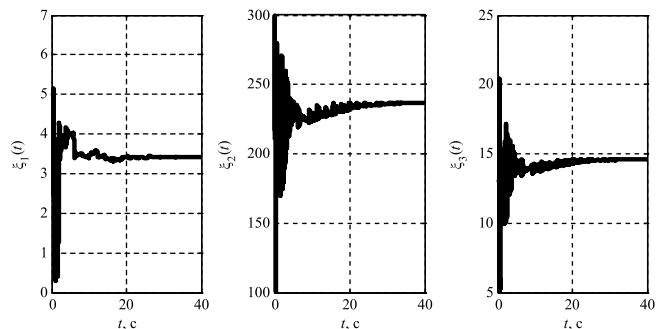


Рис. 8. Настройка параметров маятника

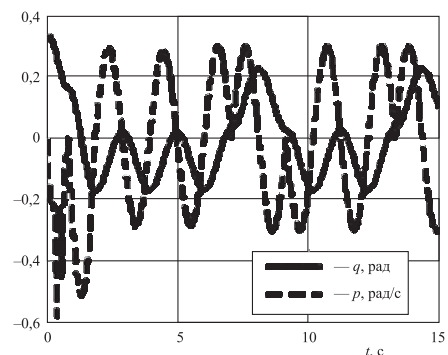


Рис. 9. Фазовые координаты маятника

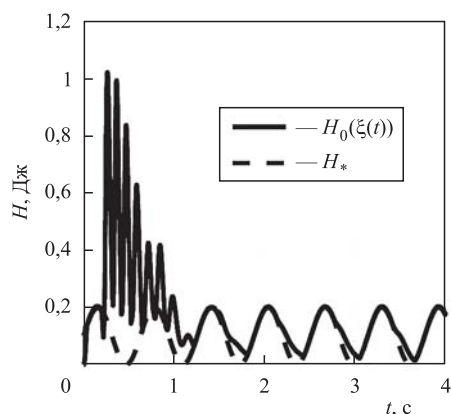


Рис. 10. Энергия маятника

в ходе настройки контуром адаптации, с точностью до 10 % совпадают со значениями, полученными в ходе физических измерений и идентификации по анализу отклика на задающие воздействия [9]. В системе возникают колебания с заданным законом изменения энергии.

**Заключение.** Рассмотрена методика синтеза адаптивных алгоритмов управления гамильтоновыми системами с учётом динамики привода на основе метода скоростного биградиента и энергетического подхода. Особенностью задачи, препятствующей непосредственному применению метода скоростного биградиента, является вхождение в целевую функцию неизвестных параметров. Предложен и обоснован способ модификации метода скоростного биградиента путём введения настраиваемой модели конечного каскада для адаптации параметров виртуального управления на втором этапе синтеза.

Синтезированы алгоритмы адаптивного управления маятником с учётом динамики привода и момента трения по описанной методике. Для учёта диссипативных сил в управление вводится компенсирующее слагаемое, зависящее от настраиваемого коэффициента трения. Решение

задачи возбуждения желаемых колебаний подтверждено стендовыми испытаниями.

### Библиографические ссылки

1. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 548 с.
2. Фрадков А.Л. Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003. 208 с.
3. Мышляев Ю.И. Адаптивное управление нелинейными аффинными объектами на основе настраиваемых скользящих режимов / Сборник трудов междунар. техн. конф. «Приборостроение — 2002», Винница; Алушта. С. 190—193.
4. Мышляев Ю.И. Схема бискоростного градиента // Сборник трудов междунар. техн. конф. «Приборостроение—2002», Винница; Алушта. С. 180—184.
5. Мышляев Ю.И. Алгоритмы скоростного биградиента / Труды XII всеросс. совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014), Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 16—19 июня 2014 г. С. 2320—2331.
6. Мышляев Ю.И. Алгоритмы управления линейными объектами в условиях параметрической неопределённости на основе настраиваемого скользящего режима // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 2. С. 111—116.
7. Мышляев Ю.И. Метод бискоростного градиента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 168—178.
8. Andrievsky B.R., Stotsky A.A., Fradkov A.L. Velocity gradient algorithms in control and adaptation problems: A survey // Automation Remote Control. 1998. Vol. 12. P. 1533—1564.
9. Краснощеченко В.И., Пчёлкин О.П., Кузнецов Д.В. Идентификация параметров лабораторного стенда «Мотор-маятник». НТК «Студенческая научная весна 2013», МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 2 с.

### Ссылка для цитирования

Мышляев Ю.И., Минкин В.О., Фиошин А.В. Управление колебаниями механической системы с приводом в условиях параметрической неопределённости // Автоматизация. Современные технологии. 2020. Т. 74. № 7. С. 339—344. DOI: 10.36652/0869-4931-2020-74-7-339-344.

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

Сдано в набор 27.04.2020.

Подписано в печать 16.06.2020.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО «Канцлер»

150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Оригинал-макет: ООО «Авансед солюшнз».

119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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