Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 73

12
2019

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

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Копылов Ю.Р., Бирюков М.И. Цифровые технологии измерения износа клиновых пазов и деформаций крупногабаритных рам тележек подвижного железнодорожного состава с применением лазера 531

Загидуллин Р.Р. Влияние подналадки металлорежущего оборудования на точность планирования в системах классов APS, MES 535

Железникова О.Е., Д. Мохаммед С. Джума, Михалькова А.Н., Микаева С.А. Освещение светодиодными источниками света 540

Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Реализация фильтра высокой частоты для развязки контуров управления силой резания по обратной связи 544

Буренин В.В. Современные способы и устройства для очистки сточных вод промышленных предприятий 550

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Ху Ц., Чжан Л., Мин Я., Ли Ю., Шэнь К. Оценивание состояния неопределённых систем 558

Волотов Е.М., Нестеров С.В., Евдокиенко А.Д., Ломоносов В.Н., Кокорина С.Б., Волотова Т.А. Метод интерполирования функций при подготовке алгоритмов и программ обработки материалов лётных экспериментов 564

Куршев А.Е., Богатырев С.Д., Железникова О.Е., Синицына Л.В., Микаева С.А. Высокоэффективные фитооблучатели на основе комбинированного спектра 569

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

Указатель статей, опубликованных в журнале «Автоматизация. Современные технологии» в 2019 г. 572

© Издательство «Инновационное машиностроение», «Автоматизация. Современные технологии», 2019

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 73 12 / 2019

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)

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Kopylov Yu.R., Biryukov M.I. Digital technologies for measuring wedge grooves wear and large-sized frames deformation of the movable consist bogies through the use of a laser 531
Zagidullin R.R. Influence of the metal-cutting equipment corrective adjustment on planning accuracy in class systems APS and MES 535
Zheleznikova O.E., Д. Mokhammed S. Dzhuma, Mikhalkova A.N., Mikaeva S.A. LED lighting 540
Mostovoy V.D., Biryukov V.P. Implementation of a high-pass filter for decoupling feedback loops for of cutting force control . . . 544
Burenin V.V. Modern methods and devices for sewage treatment of industrial enterprises 550

MODERN TECHNOLOGIES

Khu Ts., Chzhan L., Min Ya., Li Yu., Shen K. Assessment of the uncertain systems state 558
Volotov E.M., Nesterov S.V., Evdokienko A.D., Lomonosov V.N., Kokorina S.B., Volotova T.A. Method of the function interpolating at the preparation of algorithms and programs for processing materials of flight experiments 564
Kurshev A.E., Bogatyrev S.D., Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V., Mikaeva C.A. Highly efficient combined spectrum phyto-irradiators 569

REVIEW OF THE PERIODICAL PRESS

Index of articles published in the journal «Automation. Modern technologies» in 2019 572

© «Innovative Mashinostroenie» Publishers,
«Automation. Modern technologies», 2019

УДК 629.4.018:621.373:004

Ю.Р. Копылов, д-р техн. наук, **М.И. Бирюков**
(Воронежский государственный технический университет)

urkopulov@mail.ru

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕРЕНИЯ ИЗНОСА КЛИНОВЫХ ПАЗОВ И ДЕФОРМАЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РАМ ТЕЛЕЖЕК ПОДВИЖНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СОСТАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРА

Рассмотрена цифровая технология измерения износа клиновых пазов и деформаций крупногабаритных рам тележек подвижного железнодорожного состава в прямоугольной трёхкоординатной системе с применением лазера.

Ключевые слова: рама тележки подвижного состава; лазерная измерительная система; лазерный пучок.

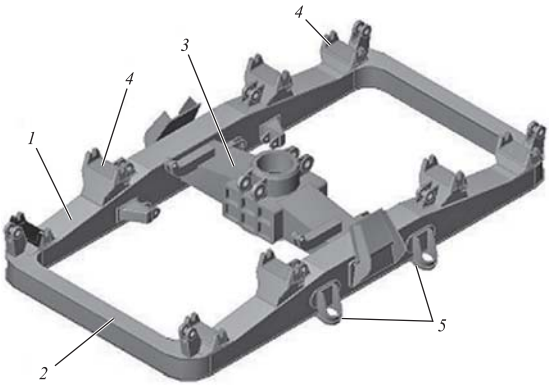
A digital technology for measuring wear of wedge grooves and deformations of large-sized frames of the bogies of rolling stock in a rectangular three-coordinate system by using a laser is considered.

Keywords: frames of bogies of rolling stock; laser measuring system; laser beam.

Анализ рассматриваемой проблемы и её актуальность. В машиностроении выпускается большая номенклатура крупногабаритных деталей, базовые поверхности которых подвержены эксплуатационному износу и деформациям, в том числе крупногабаритные, длиной до 6500 мм, сварные рамы тепловозов. В процессе эксплуатации в них происходят интенсивный износ клиновых пазов в результате больших контактных напряжений и деформация рамы в результате релаксации сварочных технологических остаточных напряжений (рис. 1).

Тяговое усилие от электродвигателя передаётся тележке железнодорожного подвижного состава через клиновой паз (рис. 1, *а*). В клиновой паз вставляется упорный сухарь, который снизу стягивается резьбовым болтом до выборки зазоров. Из-за больших давлений, которые передаются от буксы через рычаг на сухарь, упорная поверхность клинового паза изнашивается и разрушается. В ремонтном производстве на изношенную или разрушенную поверхность наваривают слой металла с последующей черновой ручной абразивной зачисткой (рис. 2, *а*) или приваривают накладки (рис. 2, *б*). Эффективность и точность такой технологии очень низкие. Она не обеспечивает точное позиционирование осей колёсных пар тепловозов, расположенных по координате *X*.

В настоящее время на современных предприятиях при изготовлении, ремонте, сборке



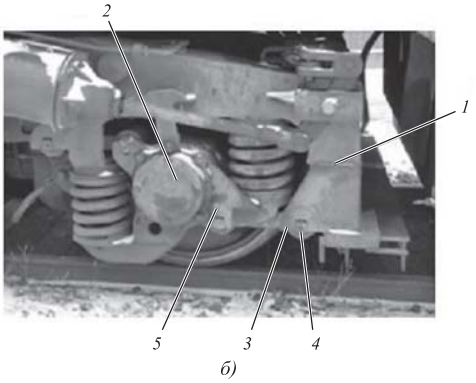


Рис. 1. Тележка тепловоза:
а — рама тележки: *1* — продольная балка; *2* — поперечная балка; *3* — опорный узел; *4* — кронштейн с клиновыми пазами для установки рычажной передачи; *5* — кронштейн подрессоренной установки на пружинах буксовых узлов; *б* — буксовый узел: *1* — рама; *2* — букса; *3* — клиновой паз; *4* — упорный сухарь; *5* — рычаг

а)

б)

Рис. 2. Восстановленная поверхность клинового паза:
а — посредством наплавки сварным электродом; *б* — посредством приваривания накладки

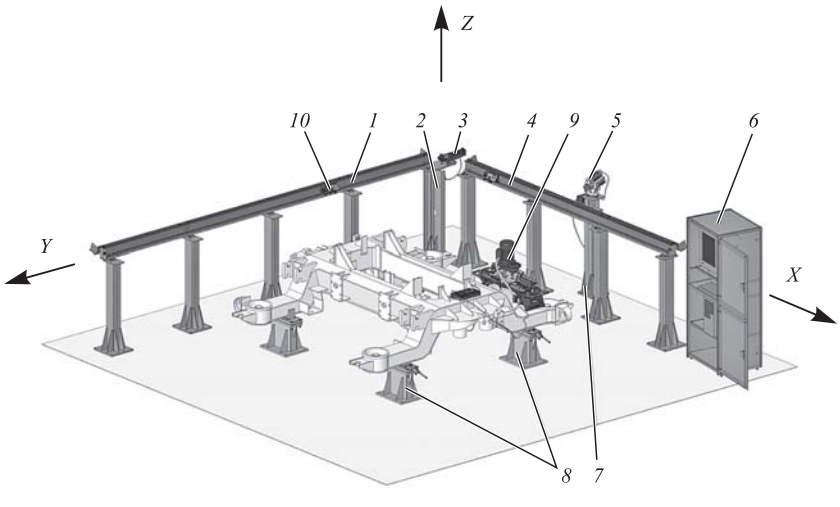


Рис. 3. Схема лазерной измерительной системы ЛИС-РТ-3 с установленной в ней рамой тележки ТЭМ2:
1 — продольная линейка ЛКЛ; *2* — стойка излучателя; *3* — лазерный излучатель ИЛ-2; *4* — поперечная линейка ЛКЛ; *5* — нивелир; *6* — шкаф управления с компьютером; *7* — стойка нивелира; *8* — подвижная опора; *9* — фрезерный модуль МФ-2; *10* — оптическое устройство поворота лазерного излучения (УПП)

и монтаже крупногабаритных рам тележек подвижного железнодорожного состава проводится обязательный контроль геометрических параметров базовых поверхностей и конструктивных элементов рамы. Для этого до сих пор используются обычные рулетки, шаблоны, штангенциркули и другие приспособления, которые не позволяют обеспечивать необходимые точность и оперативность измерений, а в ряде случаев делают контроль геометрических параметров невозможным.

Решить проблему измерения износа клиновых пазов и деформаций крупногабаритных рам тележек подвижного состава можно за счёт применения цифровых технологий с использованием лазерных систем [1—4].

Постановка задачи. Измерение и восстановление размеров, формы и расположения изношенных поверхностей должны выполняться с минимальной погрешностью. Это может быть достигнуто благодаря применению оптоэлектронных систем (в нашем случае — лазерных систем), вписанных в глобальную технологическую систему координат *XYZ* (рис. 3).

Данная задача решается в два этапа. На первом этапе рама базируется на горизонтальных подвижных опорах по лазерному пучку. Затем измеряются износ, размеры, форма и расположение клинового паза и формируется задание на восстановление поверхности клинового паза посредством наплавки металла сваркой. На втором этапе для обеспечения совпадения осей симметрии клинового паза с номинальным положением оси колёсной пары выполняется его фрезерование с помощью портативного станочного модуля, который базируется на раме по лазерному пучку. Такая технология измерения геометрических параметров износа и деформации рамы обеспечивается бесконтактной оптоэлектронной цифровой системой в глобальном технологическом пространстве координат *XYZ* за счёт применения лазерных пучков, позволяющих проводить измерительные работы без привлечения сложной и дорогостоящей техники.

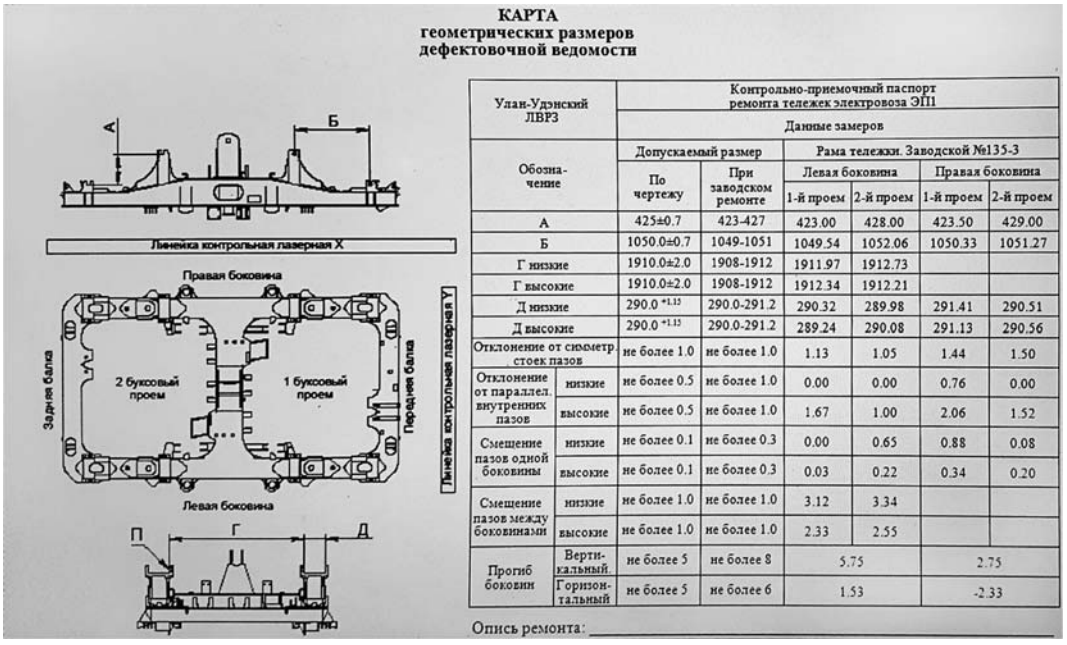
Решение задачи и возникающие при этом проблемы. Отклонения формы, расположения и размеров изношенных клиновых пазов буксовых узлов рам тележек от изначальных определяются с помощью лазерной измерительной системы

ЛИС-РТ-3 (см. рис. 3). Принцип её работы состоит в формировании прямоугольной системы координат *XYZ* за счёт перемещения лазерных пучков по продольной и поперечной направляющим с отсчётом значений перемещений. Для создания лазерных пучков по координатам *X* и *Y* используется устройство поворота лазерного пучка (УПП), в котором поворот на 90° основного лазерного пучка от излучателя осуществляется с помощью пентапризмы. Третья координата *Z* горизонтальной базовой плоскости формируется лазерным нивелиром. Для выполнения работ используется вспомогательная оснастка: шаблон клинового паза, штангенрейка с магнитным основанием, целевые знаки. Рама тележки перед измерениями базируется на отстроенных на одинаковую высоту опорах. Отклонения рассчитываются исходя из положения центра целевого знака относительно лазерного пучка, выходящего из УПП.

ЛИС-РТ-3 позволяет проводить измерения в двух режимах в системе координат *XY*. Первый режим характеризуется ручным управлением оптико-механической системой. При этом применяются целевые знаки, встроенные в шаблон клинового паза и штангенрейку с магнитным основанием. Также используются часовые индикаторы и штриховые линейки, встроенные в УПП. Лазерный пучок с помощью УПП наводится на целевой знак шаблона, установленного на изношенной поверхности клинового паза, и целевой знак штангенрейки, закреплённой на деформированной поверхности рамы. Отсчёт координат и ввод расчётных параметров в протокол измерения осуществляются вручную. Данный режим измерений является технологическим и используется при измерении, базировании и фрезерной обработке.

Второй режим осуществляется автоматически, с помощью электронного устройства цифрового отсчёта и ввода информации в ПЭВМ. Он позволяет обработать и визуализировать результаты измерений геометрических параметров в виде протокола и рекомендаций для восстановления изношенных пазов рамы тележки. Пример оформления результатов измерений представлен на рис. 4.

В процессе измерений исследуются следующие линейные размеры (рис. 4): А — расстояние по вертикали между верхним и нижним клиновыми пазами одного буксового узла; Б — межосевое расстояние по горизонтали между верхним и нижним клиновыми пазами одного из буксовых узлов; Г — расстояние между внутренними поверхностями пазов одного буксового проёма вдоль оси *Y*; Д — расстояние вдоль оси *Y* между пазами одного буксового узла. Аналогично измеряются отклонение от симметричности стоек пазов; отклонение от параллельности внутренних пазов; смещение пазов одной боковины; смещение пазов между боковинами; прогиб боковин. Числовые значения указанных параметров приведены в таблице на рис. 4. На основании результатов измерений формируется задание на восстановление и механическую обработку клиновых пазов.



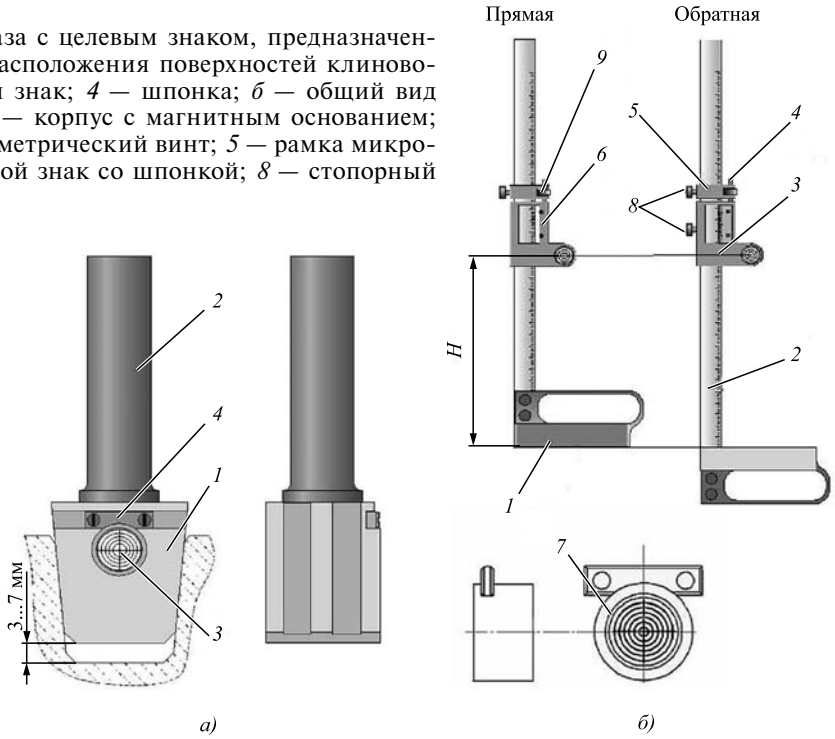
КАРТА
геометрических размеров
дефектовочной ведомости

Улан-Удэнский ЛВРЗ		Контрольно-приемочный паспорт ремонта тележек электровоза ЭП1					
		Данные замеров					
Обозначение		Допускаемый размер		Рама тележки. Заводской №135-3			
		По чертежу	При заводском ремонте	Левая боковина		Правая боковина	
				1-й проем	2-й проем	1-й проем	2-й проем
А		425±0.7	423-427	423.00	428.00	423.50	429.00
Б		1050.0±0.7	1049-1051	1049.54	1052.06	1050.33	1051.27
Г низкие		1910.0±2.0	1908-1912	1911.97	1912.73		
Г высокие		1910.0±2.0	1908-1912	1912.34	1912.21		
Д низкие		290.0 +1.15	290.0-291.2	290.32	289.98	291.41	290.51
Д высокие		290.0 +1.15	290.0-291.2	289.24	290.08	291.13	290.56
Отклонение от симметр. стоек пазов		не более 1.0	не более 1.0	1.13	1.05	1.44	1.50
Отклонение от параллел. внутренних пазов	низкие	не более 0.5	не более 1.0	0.00	0.00	0.76	0.00
	высокие	не более 0.5	не более 1.0	1.67	1.00	2.06	1.52
Смещение пазов одной боковины	низкие	не более 0.1	не более 0.3	0.00	0.65	0.88	0.08
	высокие	не более 0.1	не более 0.3	0.03	0.22	0.34	0.20
Смещение пазов между боковинами	низкие	не более 1.0	не более 1.0	3.12	3.34		
	высокие	не более 1.0	не более 1.0	2.33	2.55		
Прогиб боковин	Вертикальный	не более 5	не более 8	5.75		2.75	
	Горизонтальный	не более 5	не более 6	1.53		-2.33	

Опись ремонта: _____

Рис. 4. Общий вид карты геометрических размеров дефектовочной ведомости измеренных геометрических размеров рамы тележки

Рис. 5. Измерительная оснастка:
а — схема установки шаблона клинового паза с целевым знаком, предназначенного для определения размеров, формы и расположения поверхностей клинового паза: *1* — клин; *2* — ручка; *3* — целевой знак; *4* — шпонка; *б* — общий вид штангенрейки с магнитным основанием: *1* — корпус с магнитным основанием; *2* — рейка; *3* — нониусная рамка; *4* — микрометрический винт; *5* — рамка микрометрической подачи; *6* — нониус; *7* — целевой знак со шпонкой; *8* — стопорный винт; *9* — гайка микрометрической подачи



Вспомогательные приспособления включают в себя подвижные опоры, шаблон.

Шаблон клинового паза (рис. 5, *а*) используется для определения положения оси клинового паза и позволяет измерять величину его износа по зазору между шаблоном и дном клинового паза, который должен находится в диапазоне 3...7 мм.

Штангенрейка (рис. 5, *б*) оснащена магнитным основанием для обеспечения её устойчивого базирования на измеряемых поверхностях рамы тележки.

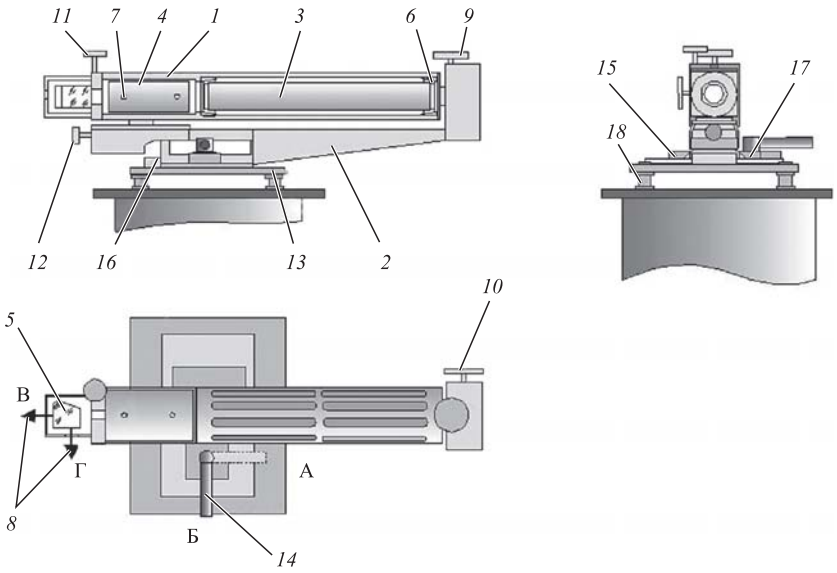


Рис. 6. Излучающий лазерный модуль:
1 — корпус; *2* — основание; *3* — лазер ЛГН-225; *4* — коллиматор; *5* — пентапризма; *6* — конусное кольцо фиксации лазера; *7* — крепёжно-юстировочный винт; *8* — взаимно перпендикулярные лазерные пучки (В — продольный; Г — поперечный); *9* — винт вертикального перемещения продольного лазерного пучка; *10* — винт горизонтального перемещения продольного и поперечного лазерных пучков; *11* — винт вертикального перемещения поперечного лазерного пучка; *12* — винт перемещения поперечного лазерного пучка в горизонтальной плоскости; *13* — площадка излучающего модуля; *14* — ручка с винтом крепления модуля; *15* — боковой упор; *16* — поперечный упор; *17* — прижим; *18* — винт вертикальных перемещений излучающего модуля

Для получения лазерного пучка используется излучающий лазерный модуль (рис. 6).

Основными конструктивными элементами излучающего модуля являются лазер *3*, коллиматор *4* и пентапризма *5*. Лазер предназначен для генерирования излучения. Коллиматор формирует кольцевую структуру лазерного пучка. Пентапризма служит для формирования двух взаимно перпендикулярных лазерных пучков равной интенсивности, которые являются базовыми по осям *X* и *Y* (см. рис. 3).

Таким образом, в цифровой технологии измерения износа клиновых пазов и деформаций крупногабаритных рам тележек подвижного железнодорожного состава можно выделить следующие основные этапы:

1. С помощью лазерно-информационной системы измерения строится система координат *XYZ* клиновых пазов рамы тележки подвижного железнодорожного состава с погрешностью не более 20 мкм, что меньше нормативного допуска, и определяются отклонения базо-

вых изношенных поверхностей клинового паза от номинального положения и их отклонение от номинального положения, которое возникает в результате деформации рамы в процессе эксплуатации.

2. По результатам измерений оформляется удобная для практического применения карта геометрических размеров дефектовочной ведомости рамы тележки, которая является основным документом для востановительного капитального ремонта рамы тележки.

3. На основании карты геометрических размеров выполняются расчёты на ПЭВМ оптимальных величин и мест наплавки металла сварочным электродом, а также определяется базирование портативного станочного модуля на раме тележки для оптимального позиционирования профильной фрезы при последующем фрезеровании клиновых пазов в целях обеспечения формы и расположения клиновых пазов, соответствующих их номинальным значениям по чертежу.

4. После ремонта с помощью лазерно-информационной системы выполняется контрольное измерение на соответствие действительных размеров, формы и расположения клиновых пазов их номинальным значениям.

Библиографические ссылки

1. **Бирюков М.И., Копылов Ю.Р.** Структура лазерной системы контроля геометрических параметров блоков дизелей // Сб. трудов 1-й Электронной междунар. науч.-техн. конф. «Автоматизация и информатизация в машиностроении». Тула, 2000. С. 118—119.

2. **Скоробогатова А.Н., Бирюков М.И.** Измерительный и обрабатывающий комплекс рам тележек локомотивов // Труды 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Евпатория, 1998. С. 242—246.

3. **Зубарев Ю.М., Косаревский С.В., Ревин Н.Н.** Автоматизация координатных измерений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во ПИМаш, 2011. 160 с.

4. **Шеверяков В.И.** К вопросу определения геометрии крыла транспортного воздушного судна в полете // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 212. С. 60—65.

Ссылка для цитирования

Копылов Ю.Р., Бирюков М.И. Цифровые технологии измерения износа клиновых пазов и деформаций крупногабаритных рам тележек подвижного железнодорожного состава с применением лазера // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 12. С. 531—535.

УДК 621

Р.Р. Загидуллин, д-р техн. наук, доц.
(Уфимский государственный авиационный технический университет)

polysoft@list.ru

ВЛИЯНИЕ ПОДНАЛАДКИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ПЛАНИРОВАНИЯ В СИСТЕМАХ КЛАССОВ APS, MES

Рассмотрено влияние подналадки металлорежущего оборудования на точность составления расписаний его работы с помощью систем APS, MES. Даны рекомендации по определению моментов начала подналадок в качестве исходных данных при построении расписаний работы оборудования.

Ключевые слова: подналадка оборудования; расписание работы оборудования; точность расписаний; выполнимость расписаний; момент начала подналадок; методика определения остаточной стойкости инструмента.

The influence of the metal-cutting equipment corrective adjustment systems on the accuracy of scheduling its work by using of APS and MES is considered. Recommendations on determining the moments of the corrective adjustments beginning as initial data when constructing equipment operation schedules are given.

Keywords: equipment corrective adjustment; equipment work schedule; accuracy of schedules; feasibility of schedules; moment of the corrective adjustments beginning, methodology for determining the residual tool life.

Введение. Повышение производительности станочного парка при существующем на предприятиях машиностроения технологическом уровне достигается за счёт сокращения непроизводительного времени и главным образом за счёт уменьшения простоев оборудования.

Для этого при составлении расписаний работы оборудования как для предприятия в целом, так и для цехов и участков используются системы APS (Advanced Planning & Scheduling) и MES (Manufacturing Execution System) [1]. В ряде случаев модули планирования могут содержаться в системах класса ERP (Enterprise Resource Planning). При этом должны быть учтены не только технологические операции на общем множестве единиц планирования (ЕП), которые представляют собою деталесборочные единицы (ДСЕ), поступающие в определённом количестве на обработку, $M\{e_{ijk},\ i = 1...m,\ j = 1...p_i,\ k \in N\}$ (m — число ЕП, p_i — число операций на i-й ЕП) и множестве оборудования $N\{1...n\}$, но также транспортные операции, операции переналадки и операции подналадки оборудования (рис. 1).

При составлении расписания ЕП представлены партиями деталей величиной a, которая зависит от различных факторов [2]. Время обработки партии a ЕП обозначают $t_{\text{о}e_{ijk}}$, момент начала обработки — $\tau^{\text{н}}_{\text{о}eik}$. Подналадка для какой-либо ЕП e_{ijk} определяется моментами начала $\tau^{\text{н}}_{\text{пн}e_{ijk}}$ и окончания $\tau^{\text{кн}}_{\text{пн}e_{ijk}}$, а также длительностью $t_{\text{пн}e_{ijk}}$.

Без учёта операций подналадки расписание не отражает реальных затрат времени и является невыполнимым. Само расписание работы оборудования ввиду большой мощности множеств M и N (проблема NP-сложности) строится с помощью эвристических алгоритмов [2, 3].

В настоящее время как за рубежом, так и в России существует много систем классов APS, MES, ERP, регламентирующих в своем составе модули планирования производства на уровне операционной технологии. Несмотря на большое число функций, которые содержат эти системы, основными с точки зрения повышения производительности являются именно модули оперативно-календарного планирования.

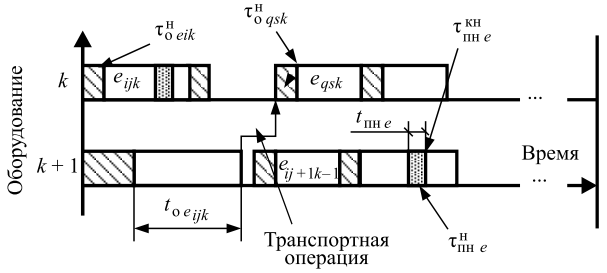


Рис. 1. Фрагмент диаграммы Гантта:
▨ — переналадка; ■ — подналадка оборудования; □ — обработка партии

Основные проблемы планирования возникают в мелкосерийном производстве, когда величина a может составлять от 1 до 20...30.

В ряде случаев некоторые системы планирования не учитывают транспортные операции. Многие системы не учитывают операции переналадки оборудования. И, к сожалению, ни одна из систем не учитывает подналадку оборудования в процессе выполнения расписаний. С подналадкой оборудования в процессе выполнения на нём той или иной ЕП будем связывать наиболее часто встречающиеся потери времени, обусловленные сменой износившегося инструмента и настройкой его на размер [4, 5]. Наибольшие проблемы в таких случаях связаны с использованием перетачиваемого инструмента. Таким образом, системы, не учитывающие операции подналадки, строят расписания работы оборудования, которые не являются выполнимыми. Учёт этого параметра позволит существенно повысить точность построенных расписаний, поэтому ниже будут рассмотрены рекомендации по определению наличия и длительности операций подналадки, а также моментов их начала и окончания.

Анализ проблемы учёта подналадок оборудования. Рассмотрим различные варианты возникновения операций подналадки и их учёта.

Металлорежущий станок (МС) в зависимости от модели оснащается несколькими инструментами в револьверной головке (РГ) (от 4 до 30). При назначении некой ЕП e_{ijk} идеальным вариантом является случай, когда для всей ЕП выполняются требования по стойкости инструментов, достаточной для выполнения ЕП (рис. 2). При этом стойкость

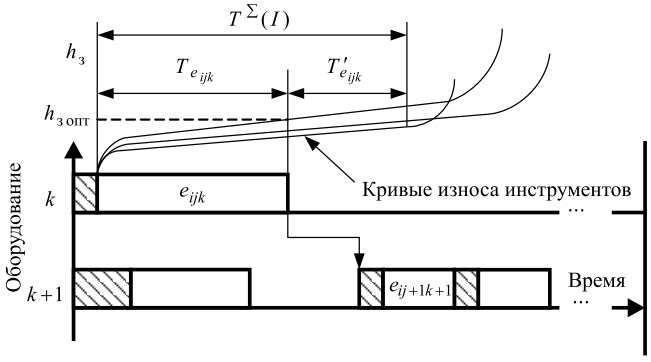


Рис. 2. Соотношение длительности обработки и стойкости инструмента:
▨ — переналадка; □ — обработка партии; $h_{\text{з опт}}$ — износ по задней поверхности инструмента в оптимальной зоне его работы; $T_{e_{ijk}}$ — стойкость множества инструментов I, необходимая для обработки ЕП e_{ijk}; $T'_{e_{ijk}}$ — остаточная стойкость множества инструментов I до очередной подналадки

до операции подналадки для всего множества инструментов I определяется как

$$T^{\Sigma}(I) = \min(T_l, l = 1...I), \quad (1)$$

где T_l — стойкость l-го инструмента, принадлежащего множеству инструментов I в РГ станка.

Следует иметь в виду, что поскольку не все инструменты в РГ работают одновременно, то T_l в отличие от $T_{e_{ijk}}$ представляет собой величину, состоящую только из времени работы инструмента, без учёта его простоя в процессе работы над ЕП любого другого инструмента, смены деталей, контрольных и других вспомогательных операций.

Подналадка МС не требуется, если выполняется неравенство

$$T_{e_{ijk}} \geqslant t_{\text{о}e_{ijk}}. \quad (2)$$

Расчёт стойкости T_l для каждого l-го инструмента ведётся согласно известным методикам [6—8].

Если неравенство (2) не выполняется, это означает, что хотя бы по одному инструменту из множества I стойкость T_l меньше длительности обработки ЕП e_{ijk}. В этом случае возникает операция подналадки.

В ряде случаев число инструментальных гнёзд в РГ МС значительно больше требуемого для обработки ЕП e_{ijk}. В данной ситуации устанавливаются инструменты-дублёры. При этом операции подналадки не требуется, но возникает задача оперативного определения текущего износа используемых инструментов, которая может решаться с помощью аппаратно-программных средств [9].

Неравенство (2) может служить основанием для расчёта величины партии ЕП a: если неравенство (2) не выполняется, то величина a уменьшается до тех пор, пока оно не будет выполняться.

В рассматриваемом случае отсутствие учёта стойкости инструментов в расписаниях работы МС может привести к тому, что появится целый ряд подналадок, не учтённых при построении расписания. Если величина a достаточно велика, что характерно для среднесерийных производств (например, при $T_{e_{ijk}}$ не менее 1,5...2,0 ч), наличие операций подналадок легко рассчитывается.

Сложной проблемой в мелкосерийном производстве является ситуация, когда неравенство (2) не выдерживается одновременно

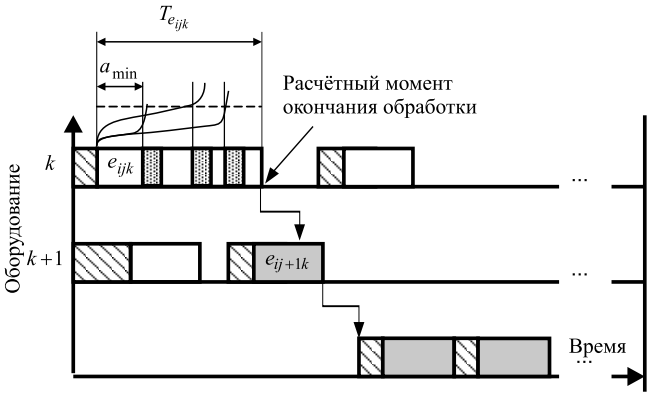


Рис. 3. Влияние операций подналадки на расписание: — переналадка; — подналадка оборудования; — обработка партии; — нарушение расписания

для нескольких инструментов на протяжении обработки партии ЕП (рис. 3). При этом возникает нарушение расписания работы всего участка или цеха, а в некоторых случаях и всего предприятия ввиду того, что многие работы, связанные либо с текущей ЕП, при выполнении которой возникли непредвиденные операции подналадки, либо с оборудованием, которое связано в расписании с этой ЕП, не могут быть выполнены в срок (работы, отмеченные серым цветом на рис. 3). Кроме того, данная проблема может касаться не одной ЕП, а нескольких. При возникновении описанных ситуаций расписание работы оборудования является полностью невыполнимым.

Рассмотренная проблема характерна для мелкосерийного производства в случаях, когда имеют дело с труднообрабатываемыми материалами — жаропрочными сплавами, деталями, имеющими после термообработки твёрдость выше 60 HRC. Но чаще всего она обусловлена отсутствием предварительных расчётов длительности подналадок и моментов их начала. В этих случаях часто рекомендуется экспериментальным путём уменьшать величину партии a согласно минимальной стойкости инструмента $\min(T_l, l = 1...I)$ до величины $a_{\min}$ (см. рис. 3) при условии, что величина a будет равна хотя бы единице.

Особым случаем является комплектование РГ МС уже использованным ранее инструментом, имеющим остаточную стойкость. Данная ситуация представлена на рис. 4, где $T'_{e_{ijk}}$ — остаточная стойкость инструмента после обработки партии ЕП e_{ijk}; $T_{e_{qsk}}$ — стойкость инструмента, требуемая для обработки партии ЕП e_{qsk}. При этом если после выполненной ЕП e_{ijk} на МС поступает некая ЕП e_{qsk},

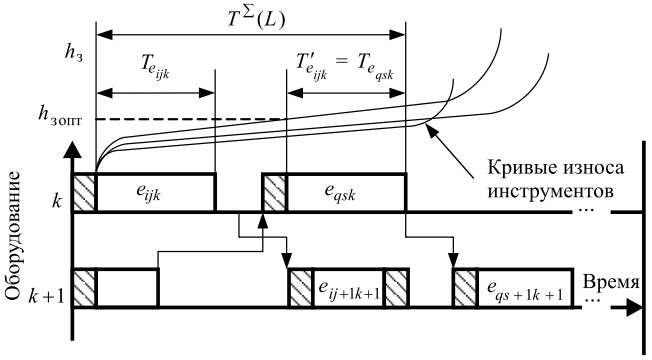


Рис. 4. Использование остаточной стойкости инструментов:
▨ — переналадка; □ — обработка партии

у которой во многом совпадают с предыдущей или являются близкими по значению многие технологические параметры — материал детали, режимы обработки, длительность выполнения ЕП, то остаточной стойкости всего комплекта инструментов в РГ МС может хватить для выполнения работы, т. е. выполняется неравенство

$$T'_{e_{ijk}} \geqslant T_{e_{qsk}}. \qquad (3)$$

В нашем случае необходимо расчётным способом определять степень износа инструментов и вносить коррективы в настройку управляющей программы или корректировать данный допустимый износ с пульта оператора при настройке на размер. В ряде случаев, остаточной стойкости может хватить на несколько (две-три) ЕП.

Если же технологические параметры обработки ЕП e_{qsk} и предыдущей ЕП резко различаются хотя бы по одному инструменту из общей инструментальной наладки, может наблюдаться картина, представленная на рис. 2.

В любом случае, даже при полном совпадении технологических параметров предыдущей и вновь поступающей на обработку ЕП, необходимо определять остаточную стойкость инструментов, которые будут использоваться повторно.

Иногда для определения остаточной стойкости инструмента используются аппаратно-программные средства [9], которые дают приближённое значение $T'_{e_{ijk}}$. Но данные методы чаще всего используются уже при построенном расписании работ парка МС, служат в какой-то мере страховочным инструментарием в общем контуре SCADA-систем (Supervisory Control And Data Acquisition) и присутствуют в контуре диспетчирования MES-систем [1].

Предлагаемое решение по учёту подналадок. Поскольку в подавляющем большинстве случаев стойкость инструмента определяется в ходе экспериментов и отсутствуют чёткие зависимости при её определении, в особенности при определении остаточной стойкости, рассмотрим вопрос определения остаточной стойкости l-го инструмента через связанную со стойкостью длину резания $L_{рез}$.

Исходя из первоначальной стойкости T_l l-го инструмента, входящего в множество I, всегда можно определить длину резания [6], соответствующую заданной стойкости, $L_{рез}(T_l)$. Зная число деталей в обработанной партии e_{ijk} величиной a, можно определить остаточную стойкость инструмента через ту же длину резания:

$$T'(l) = f(L_{рез}(T_l) - L_{рез}(T_l(e_{ijk}))), \qquad (4)$$

где $L_{рез}(T_l) - L_{рез}(T_l(e_{ijk})) = L'_{рез}$ — остаточная длина резания, соответствующая остаточной стойкости инструмента.

Если следующая ЕП e_{qsk} (см. рис. 4) аналогична предыдущей ЕП e_{ijk} по физическим характеристикам материала и выполняется условие

$$L_{рез}(T_l(e_{ijk})) = L_{рез}(T_l(e_{qsk})), \qquad (5)$$

то выполняется и условие

$$T'_{e_{ijk}} = T_{e_{qsk}}. \qquad (6)$$

В этом случае подналадка не требуется. При невыполнении равенств (5) и (6) для случаев, когда обрабатываемость ЕП e_{qsk} хуже, чем ЕП e_{ijk}, подналадка требуется и необходимо учитывать момент её начала при построении расписания работы оборудования.

Если ЕП e_{qsk} имеет худшую, чем ЕП e_{ijk}, обрабатываемость, то остаточную стойкость l-го инструмента можно приблизительно определить по следующей формуле:

$$T_{e_{qsk}} = f(L_{рез}(e_{qsk})) = T'_{e_{ijk}} \frac{L'_{рез}(e_{ijk})}{L_{рез}(e_{ijk})} K_м, \qquad (7)$$

где $K_м$ — коэффициент обрабатываемости [6].

Второй сомножитель в правой части формулы (7) имеет вид дроби. Это объясняется тем, что после обработки ЕП e_{ijk} свойства ре-

жущего материала так или иначе изменяются — в силу износа задней поверхности режущей части инструмента, притупления вершины режущей кромки, адгезионных процессов [10] и других факторов [8]. И чем меньше $L'_{\text{рез}}(e_{ijk})$, тем больше влияние этих указанных факторов.

Далее, зная длину резания $L_{\text{рез}}(e_{qsk})$, а также параметры всех технологических переходов (диаметры, длины поверхностей), согласно технологическому процессу и чертежам ЕП e_{qsk} определяют стойкость инструмента для ЕП e_{qsk}:

$$T_{e_{qsk}} = f(L_{\text{рез}}(e_{qsk})), \tag{8}$$

а также искомый момент начала смены l-го инструмента при обработке ЕП e_{qsk} (момент начала подналадки):

$$\tau^{\text{н}}_{\text{пн}e_{qsk}} = \tau^{\text{н}}_{\text{о}qsk} + T_{e_{qsk}}. \tag{9}$$

Момент конца подналадки $\tau^{\text{кн}}_{\text{пн}e_{qsk}}$ для данного инструмента определяется исходя из нормативов, принятых на предприятии, по формуле

$$\tau^{\text{кн}}_{\text{пн}e_{qsk}} = \tau^{\text{н}}_{\text{пн}e_{qsk}} + t_{\text{пн}e_{ijk}}. \tag{10}$$

Данные моменты времени определяются для всего множества инструментов I в инструментальной наладке.

Если в результате окажется, что стойкость l-го инструмента, найденная через длину резания по формуле (8), не меньше длительности обработки ЕП e_{qsk}, т. е.

$$T_{e_{qsk}}(L_{\text{рез}}(e_{qsk})) \geqslant t_{\text{о}e_{qsk}}, \tag{11}$$

то это означает, что ЕП e_{qsk} может быть обработана после ЕП e_{ijk} без смены инструмента. В противном случае требуется смена инструмента — подналадка станка. Проверка условия (11) осуществляется для всего множества инструментов I в наладке.

Зная параметры, вычисленные по формулам (4)...(10), можно определить моменты начала и окончания подналадок — моменты смены тех или иных инструментов — $\tau^{\text{н}}_{\text{пн}e}$ и $\tau^{\text{кн}}_{\text{пн}e}$, которые войдут в число исходных данных при построении расписания работы оборудования (см. рис. 1) и позволят повысить его информативность и точность.

Выводы. Остаточная стойкость каждого l-го инструмента в наладке станка, а также моменты смены инструмента вследствие возможного износа в процессе обработки той или иной ЕП могут быть определены различными методами, но при этом моменты начала и окончания смены любого инструмента должны быть рассчитаны заранее и учтены при построении расписания работы оборудования. Если указанное будет выполнено, то можно использовать эти данные в качестве исходных при составлении расписания и оно будет выполнимо, в отличие от непрогнозируемых случаев, когда моменты замены инструмента неизвестны. Впоследствии расписание работы оборудования относительно расчётного неизбежно будет нарушаться (см. рис. 3) и в ряде случаев становится невыполнимым.

Библиографические ссылки

1. **Загидуллин Р.Р.** Управление машиностроительным производством с помощью систем MES, APS, ERP. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 372 с.

2. **Загидуллин Р.Р.** Планирование машиностроительного производства: учебник. Старый Оскол: ТНТ, 2013. 392 с.

3. **Тимковский В.Г.** Дискретная математика в мире станков и деталей: Введение в математическое моделирование задач дискретного производства. М.: Наука, 1992. 144 с.

4. **Дальский А.М., Арутюнова И.А., Барсукова Т.М.** и др. Технология конструкционных материалов: учебник / под ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 1985. 448 с.

5. **Колесов И.М.** Основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 1997. 592 с.

6. **Режимы** резания металлов: справочник / под ред. Ю.В. Барановского. М.: Машиностроение, 1972. 363 с.

7. **Грановский Г.И., Грановский В.Г.** Резание металлов. М.: Высш. шк., 1985. 304 с.

8. **Макаров А.Д.** Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

9. **Мартинов Г.М., Синопальников В.А., Григорьев А.С.** Устройство контроля износа и прогнозирования остаточной стойкости режущего инструмента для системы ЧПУ станка // Патент России № 2417140. 2011. Бюл. № 12.

10. **Лоладзе Т.Н.** Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. 320 с.

Ссылка для цитирования

Загидуллин Р.Р. Влияние подналадки металлорежущего оборудования на точность планирования в системах классов APS, MES // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 12. С. 535—539.

УДК 621.382.2:617.7-001.15

О.Е. Железникова, канд. техн. наук, доц., **Д. Мохаммед С. Джума, А.Н. Михалькова**
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск),
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(МИРЭА — Российский технологический университет, г. Москва)

mikaeva@npo.lit.ru

ОСВЕЩЕНИЕ СВЕТОДИОДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА

Статья посвящена исследованиям условий освещения светодиодными источниками света второго поколения. Экспериментально установлено, что освещение светодиодами второго поколения не вызывает негативного воздействия на орган зрения и организм человека в целом. Показано, что происходящие при выполнении зрительных работ изменения функциональных показателей органа зрения укладываются в соответствующие границы физиологических колебаний и имеют обратимый характер. Оценены интегральные показатели эффективности освещения светодиодами второго поколения по зрительной работоспособности и степени зрительного утомления. Показана практическая значимость полученных результатов.

Ключевые слова: светодиоды второго поколения; экспериментальная осветительная установка; зрительная работоспособность; зрительное утомление; эффективность освещения.

The article is devoted to the study of lighting conditions with second-generation LED light sources. It is experimentally determined that lighting with second-generation LEDs does not cause a negative effect on the organ of vision and the human body as a whole. It is shown that changes in the functional parameters of the vision organ that occur during visual work fit into the corresponding boundaries of physiological fluctuation and are reversible. The integral indicators of the illumination efficiency by second-generation LEDs for visual performance and degree of visual fatigue are evaluated. The practical significance of the obtained results is shown.

Keywords: second generation LEDs; experimental lighting installation; visual performance; visual fatigue; lighting efficiency.

Высокие темпы роста рынка светодиодной продукции, обеспечивающей значительную экономию электроэнергии и снижение эксплуатационных расходов, способствуют её широкому использованию. Однако основной особенностью излучения современных белых светодиодов, в первую очередь, является значительная интенсивность потока излучения в синей части спектра. Этот факт вызывает в научной среде широкий разброс мнений по медико-биологическим аспектам воздействия излучения светодиодов на орган зрения, психофизиологическое состояние и общее физическое здоровье человека [1—3]. В нашей стране для исследования освещения светодиодами фактически используются результаты зарубежных работ по этому направлению.

В настоящее время на рынке появились белые светодиоды второго поколения, разработка которых направлена на снижение возможной фотобиологической опасности для зрения, так как их спектр приближён к солнечному [4, 5]. Можно предположить, что светодиоды второго поколения не будут так опасны для органа зрения, как считают некоторые специалисты. Однако доказать это возможно только на основе проведённых экспериментальных исследований. В российских и зарубежных источниках встречаются только отдельные результаты исследований по влиянию освещения светодиодами первого поколения на некоторые функции зрения и зрительную работоспособность, которые крайне противоречивы и неоднозначны [6, 7]. Это даёт основание считать проведённые исследования актуальными.

Целью данной работы является всесторонняя оценка эффективности освещения светодиодами (ОСД) второго поколения, учитывающая состояние органа зрения человека, интегральные показатели зрительной работоспособности.

Анализ существующих методик определения отдельных показателей позволил выбрать наиболее адекватные поставленной задаче — оценке эффективности условий освещения светодиодами при выполнении зрительно-напряжённых работ.

Рис. 1. Экспериментальная осветительная установка

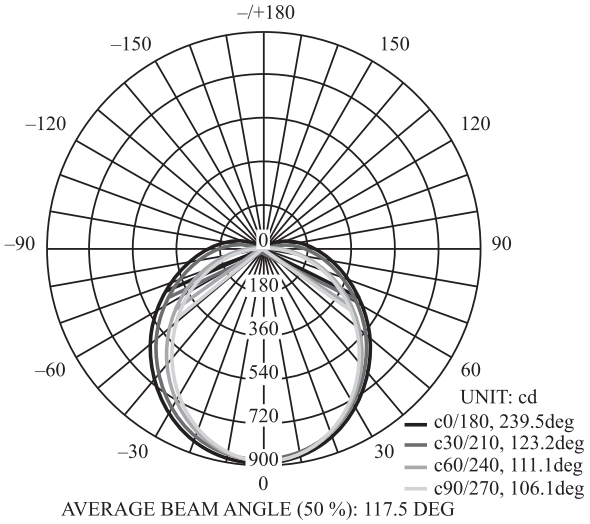


Рис. 3. КСС опытно-экспериментального светильника со светодиодами второго поколения в четырёх меридиональных плоскостях

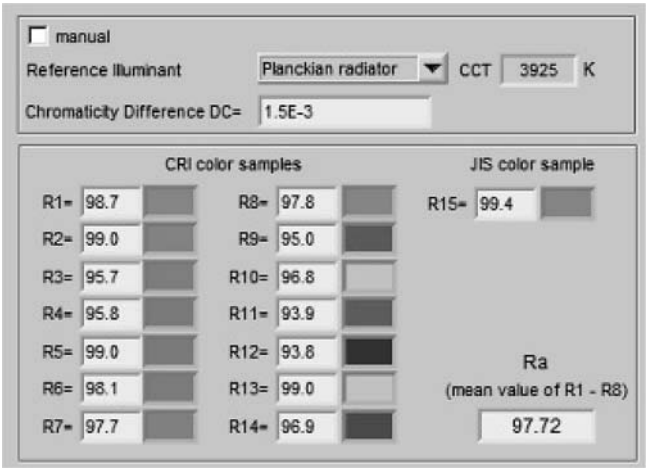


Рис. 4. Специальные и общий индексы цветопередачи опытно-экспериментального светильника со светодиодами второго поколения

Разработанная нами и использованная в эксперименте комплексная методика оценки влияния условий освещения светодиодами на показатели состояния органа зрения и организма человека в целом подробно описана в работах [8—13].

Для проведения лабораторных исследований была разработана и смонтирована экспериментальная осветительная установка (рис. 1).

Коэффициенты отражения ρ ограждающих поверхностей потолка, стен и пола исследовательских помещений составляли соответственно 0,7; 0,5; 0,3; коэффициент отражения рабочей поверхности — 0,3. Ограждающие и рабочие поверхности помещений были диффузно-отражающими.

Для экспериментальных исследований был выбран опытно-экспериментальный светильник со светодиодами второго поколения, изготовленный ОАО «Ардатовский светотехнический завод». В качестве базового варианта (для сравнения вариантов освещения) использован светильник с люминесцентными лампами (ЛЛ) типа ЛВО 04-4×14-041 PRS того же производителя.

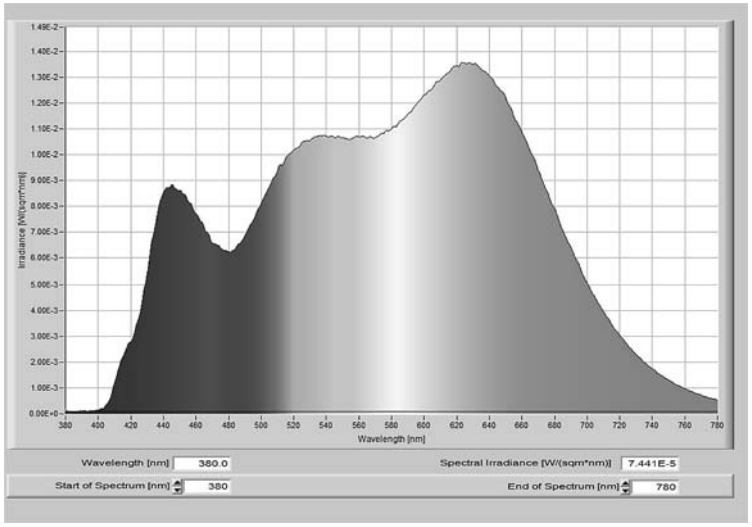


Рис. 2. Спектр излучения опытно-экспериментального светильника со светодиодами второго поколения

В Центре коллективного пользования «Светотехническая метрология» МГУ им. Н.П. Огарёва были измерены фотометрические и спектроколориметрические параметры отобранных светильников. На рис. 2...4 приведены полученные спектр излучения, кривые силы света (КСС) и значения индексов цветопередачи опытно-экспериментального светодиодного светильника.

Таблица 1

Нормируемые количественные и качественные показатели световой среды производственных помещений

Зрительная работа	Плоскость нормирования освещённости (Г — горизонтальная), м	Освещённость рабочей поверхности при общем освещении, лк	Объединённый показатель дискомфорта *UGR*, не более	Коэффициент пульсации освещённости, %, не более
Работа высокой точности IIIа разряда по СП 52.13330.2016	Г-0,8	500	25	15

Экспериментальные исследования были проведены при двух уровнях освещённости E — 500 и 1000 лк. Изменение уровня освещённости достигалось соответственно использованием пускорегулирующей аппаратуры (ПРА) и устройств управления, регулируемых по протоколу DALI.

Перед экспериментом варианты освещения были смоделированы в программе DIALux в целях проверки предъявляемых требований [10] (табл. 1).

В качестве модели зрительной работы выбрана работа с металлическими изделиями, характерная для электроламповой промышленности, продолжительностью 90 мин. Функциональная нагрузка заключалась в выявлении брака (контроль качества) и сортировке металлических изделий (токовых вводов, выполненных из различных металлов и сплавов). Работа в течение 90 мин по выбранной модели эквивалентна по зрительному утомлению работе в реальных производственных условиях в течение восьмичасового рабочего дня.

У десяти участников эксперимента, отобранных из числа студентов-добровольцев в возрасте 20...25 лет, рефракция была преимущественно эмметропической; острота зрения на оба глаза — 1,0; цветоощущение без патологии.

Процедура одного эксперимента была примерно следующей: адаптация к условиям освещения в течение 15 мин; измерение критической частоты слияния световых мелькаций (КЧСМ), временного порога ахроматической адиспаропии, ближайшей точки ясного видения, диастолического и систолического артериального давления и частоты сердечных сокращений; работа с корректурными пробами; полуторачасовая зрительная работа; повторное измерение функций зрения и артериального давления; заполнение анкет субъективной оценки.

Рассмотрим отдельные результаты экспериментальных исследований. Статистическая обработка результатов исследований объёма абсолютной аккомодации (ОАА) показала, что в сравниваемых вариантах освещения сдвиги в значениях ОАА не достоверны ($p < 0{,}05$ по t-критерию Стьюдента, где p — коэффициент Стьюдента), следовательно, аккомодационно-мышечный аппарат при освещении светодиодными источниками света второго поколения функционирует не хуже, чем при освещении ЛЛ (ОЛЛ).

Исследования состояния центрального звена органа зрения до и после работы по методу КЧСМ не позволили выявить наиболее предпочтительный вариант освещения: t-критерий Стьюдента не подтвердил достоверности различий при исследованных уровнях освещённости. Снижение КЧСМ в ходе лабораторного эксперимента связано с выполняемой зрительной работой; этот процесс обратим — к началу следующего дня показатели восстанавливались до исходных значений. То есть в условиях освещения светодиодами второго поколения угнетающего действия на состояние центральной нервной системы не обнаружено.

Показатели зрительной работоспособности: производительность и качество работы определялись соответственно по показателям время прохождения теста и число ошибок, допущенных при прохождении теста, при помощи комплекса для психофизиологических исследований КПФК-99М «ПСИХОМАТ» (табл. 2).

Сопоставительный анализ данных табл. 2 позволил констатировать их одинаковый качественный характер — в процессе полуторачасовой зрительной работы её производительность достоверно снижалась. Повышение уровня освещённости с 500 до 1000 лк не приводило к увеличению производительности зрительной работы. Оценка значимости полученных различий по производительности зрительной работы (по t-критерию Стьюдента) при различных уровнях освещённости показала, что имеющаяся разница случайна, поскольку уровень значимости $p > 5$ %.

Таблица 2

Производительность зрительной работы (ПЗР) в условиях освещения светодиодами второго поколения

E, лк	Статистические показатели, с				Достоверность различий по *t*-критерию Стьюдента
	До работы		После работы		
	ПЗР $\bar{x}$, с	Доверительный интервал $t\sigma_{\bar{x}}$	ПЗР $\bar{x}$, с	Доверительный интервал $t\sigma_{\bar{x}}$	
500	99,71	10,04	101,55	5,28	<0,05
1000	103,57	17,03	105,50	10,46	<0,05

С ростом зрительного утомления в процессе полуторачасовой работы число ошибок возрастало. Так, при $E = 500$ лк качество работы снижалось на 62,8 %, при $E = 1000$ лк — на 55,4 %. Что касается сопоставления показателей качества работы при разных уровнях освещённости, то до работы при $E = 1000$ лк относительно уровня $E = 500$ лк число ошибок меньше на 2,6 %, после работы — на 7,6 %, однако *t*-критерий Стьюдента не подтвердил достоверности этих различий. То есть оптимальный уровень *E* для работ IIIа разряда в случае применения светодиодов второго поколения не выше 500 лк.

В заключение следует подчеркнуть, что работы по гигиенической оценке осветительных установок со светодиодами второго поколения необходимо продолжать.

Анализ полученных результатов показал, что освещение светодиодами второго поколения не оказывает отрицательного (негативного) воздействия на орган зрения и показатели зрительной работоспособности (возрастная группа 20...25 лет). Исследования, выполненные при разных условиях освещения (ОСД и ОЛЛ), выявили как тесную связь функций зрения с компенсаторно-приспособительной реакцией организма, так и устойчивость адаптивных систем, ответственных за регуляцию чувствительности органа зрения и организма в целом. Результаты проведённых исследований могут использоваться для разработки практических рекомендаций по реализации освещения светодидами второго поколения.

Авторы статьи выражают благодарность докторам медицинских наук С.В. Кирюхиной и С.В. Аксеновой за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований.

Библиографические ссылки

1. **Lyons L.** LED-based products must meet photobiological safety standart. Pt. 1 // LEDs magazine. 2011. Vol. 46. P. 31.

2. **Rea M.S., Figueiro M.G., Bullough J.D., Bierman A.** A model of phototransduction by the human circadian system // Brain Research Reviews. 2005. Vol. 50. P. 213—218.

3. **The True** Knowledge about White LEDs and Biological Clocks // LED professional Review. 2011. Vol. 28. P. 22.

4. **TRI-R** Technology. Cop.2015. URL: http://trir-pj.com/en/technology (дата обращения: 01.03.2019).

5. **Seoul** Semiconductor. «SunLike» Series LEDs. Cop. 2017. URL: http://www.seoulsemicon.com/en/technology/Sunlike (дата обращения: 01.03.2019).

6. **Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V.** Metodological grounds of study of light-emitting diode illumination effectiveness // Intern. J. of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10 (24). P. 44915—44919.

7. **Zheleznikova O.E., Sinitsyna L.V., Mikaeva S.A.** To the problem of hygienic efficiency of LED lighting facilities // Biosciences Biotechnology Research Asia. 2015. Vol. 12 (3). P. 2373—2382.

8. **Zheleznikova O.E.** Determination of LED lighting effectiveness on visual performance and visual fatigue degree // Intern. J. of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10 (12). P. 31463—31469.

9. **Железникова О.Е., Амелькина С.А., Синицына Л.В., Кирюхина С.В.** Разработка комплексной методики оценки влияния условий светодиодного освещения на состояние органа зрения и организма человека в целом // Естественные и технические науки. 2013. № 5 (67). С. 249—257.

10. **СП 52. 13330.2016.** Естественное и искусственное освещение.

11. **Микаева С.А.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: Русайнс, 2017. 136 с.

12. **Микаева С.А.** Повышение качества технологии производства приборов, установок и систем на базе перспективных источников света. М.: Московский технологический ун-т (МИРЭА), 2017. 150 с.

13. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: Русайнс, 2018. 135 с.

Ссылка для цитирования

Железникова О.Е., Д. Мохаммед С. Джума, Михалькова А.Н., Микаева С.А. Освещение светодиодными источниками света // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 12. С. 540—543.

УДК 681.514

В.Д. Мостовой, В.П. Бирюков, д-р техн. наук, проф.
(Балаковский инженерно-технологический институт — филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», г. Балаково Саратовской обл.)
bvp-bittu@mail.ru

РЕАЛИЗАЦИЯ ФИЛЬТРА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РАЗВЯЗКИ КОНТУРОВ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОЙ РЕЗАНИЯ ПО ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Предложена система управления силой резания при токарной обработке путём изменения продольной подачи с двумя исполнительными механизмами на данное управляющее воздействие с развязкой контуров управления по частоте и реализацией фильтра высоких частот в виде системы управления с отрицательной обратной связью. Это позволяет повысить эффективность работы системы при стохастическом возмущающем воздействии.

Ключевые слова: токарная обработка; адаптивные взаимосвязные системы; математическое моделирование; пьезоактюатор; частотная развязка.

A system for controlling the cutting force during turning by changing the influence of the longitudinal feed with two influence actuators on this control action and with the decoupling of the control loops by frequency and the implementation of a high-pass filter in the form of a control system with negative feedback is proposed. This allows increasing the efficiency of the system work under stochastic disturbing action.

Keywords: turning; adaptive interconnected systems; mathematical modeling; piezo actuator; frequency decoupling.

Введение. Технологический процесс токарной обработки протекает при постоянном воздействии возмущений, вызванных различными случайными факторами, что приводит к повышению погрешностей обработки. Одним из вариантов повышения качества обработки в данных условиях является стабилизация силы резания путём корректировки продольной подачи, что позволяет компенсировать влияние на качественные показатели обрабатываемых изделий тех составляющих возмущающих воздействий, которые приводят к изменению силы резания.

Однако эффективность стабилизации силы резания широко распространёнными системами управления по каналу «продольная подача — сила резания» ограничена недостаточным быстродействием приводов продольной подачи. Наличие высокочастотных составляющих возмущения обусловливает необходимость поиска новых путей повышения эффективности работы систем управления.

Анализ существующих систем управления. В работах [1, 2] исследованы каскадные системы управления силой резания при токарной обработке по продольной подаче и система управления с двумя исполнительными механизмами на одно управляющее воздействие. Данные системы позволили расширить частотный диапазон эффективной работы и повысить показатели эффективности управления силой резания. Диапазон эффективной работы определялся частотным диапазоном, на котором модуль амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) замкнутых систем управления по возмущению $АЧХ_f \leqslant 1$. Эффективность систем оценивалась по коэффициенту отношения дисперсий регулируемой величины разомкнутой и замкнутой систем управления при влиянии стохастических возмущающих воздействий с одинаковыми спектральными плотностями.

Наибольшую эффективность показала система, включающая дополнительно к типовому контуру управления силой резания с приводом продольной подачи в качестве исполнительного механизма, высокочастотный контур с исполнительным механизмом на основе тонкоплёночного пьезоэлектрического микроактюатора [3], один торец которого закреплён на суппорте, а на другом закреплён резец. Резец совершает управляющие перемещения вместе с суппортом по продольной оси от двигателя продольной подачи и относительно суппорта от пьезоэлектрического микроактюатора. В отличие от двигателя продольной подачи, имеющего большой диапазон изменения подачи, но относительно медленное действие, микроактюатор имеет высокое быстродействие, но малый диапазон изменения подачи.

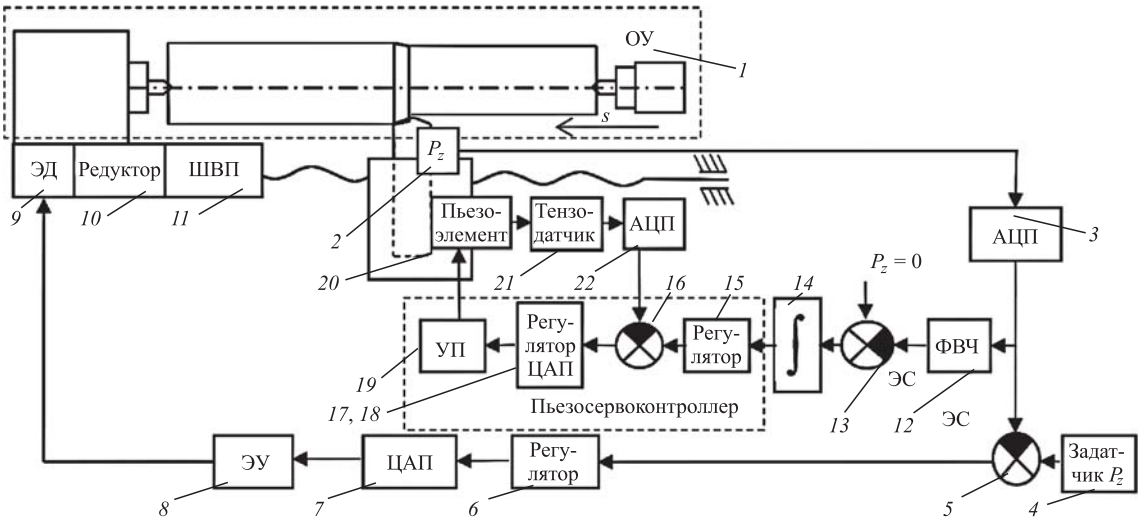


Рис. 1. Функциональная схема исходной системы управления

Функциональная схема системы управления представлена на рис. 1.

Низкочастотный контур управления силой резания содержит датчик силы резания *2*, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) *3*, компьютер, в котором реализованы задатчик *4*, элемент сравнения *5*, ПИД-регулятор *6*, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) *7*, электронный усилитель (ЭУ) *8*, двигатель продольной подачи *9* в качестве исполнительного механизма, редуктор *10*, шариковинтовую пару (ШВП) *11*, объект управления (ОУ) *1* процессом резания. Высокочастотный контур управления содержит датчик силы резания *2*, АЦП *3*, фильтр высокой частоты (ФВЧ) *12*, элемент сравнения *13*, интегрирующее звено *14*, ПИД-регулятор *15*, выдающий задание каскаду управления удлинением пьезоэлемента, который включает элемент сравнения *16*, ПИД-регулятор внутреннего контура *17*, цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) *18*, электронный усилитель-преобразователь (УП) *19*, пьезоэлемент *20*, тензодатчик удлинения пьезоэлемента *21* с АЦП *22*.

Система работает следующим образом. Путём корректировки продольной подачи с помощью двигателя продольной подачи по обратной связи стабилизируется низкочастотная составляющая силы резания. Каскадным управлением удлинением пьезоэлемента стабилизируется высокочастотная составляющая силы резания.

Для устранения взаимного влияния данных двух контуров друг на друга через объект управления и взаимной генерации контурами дополнительных возмущающих воздействий с помощью фильтров низких и высоких частот выполнена их частотная развязка. Роль естественного фильтра низких частот выполняют элементы и объект управления низкочастотного контура, ограничивающие его быстродействие. Фильтром высоких частот *12* выделяется высокочастотная составляющая силы резания. Полученный сигнал вычитается из нулевого задания для получения ошибки управления высокочастотной составляющей силы резания, ошибка интегрируется для преобразования соответствующего сигнала, пропорционального скорости подачи, в сигнал, пропорциональный положению режущего инструмента (удлинению пьезоэлемента). На основании полученной ошибки по ПИД-закону рассчитывается управляющее воздействие, используемое в качестве задающего воздействия на алгоритм управления внутреннего каскада, управляющего по обратной связи удлинением пьезоэлемента. Текущее значение удлинения пьезоэлемента, пропущенное через АЦП, вычитается из заданного значения, по полученному отклонению по ПИД-закону рассчитывается управляющее воздействие внутреннего каскада, которое усиливается и подаётся на пьезоэлемент, удлинение которого изменяется и приводит к уменьшению влияния высокочастотной составляющей возмущающего воздействия на силу резания.

Эффективность работы исходной системы управления исследовалась в среде имитационного моделирования Simulink пакета программ MATLAB на основании определённых экспериментально [2] математических моделей объекта управления и быстродействующего исполнительного механизма, а также моделей элементов системы управления и типовой модели электродвигателя, построенных по па-

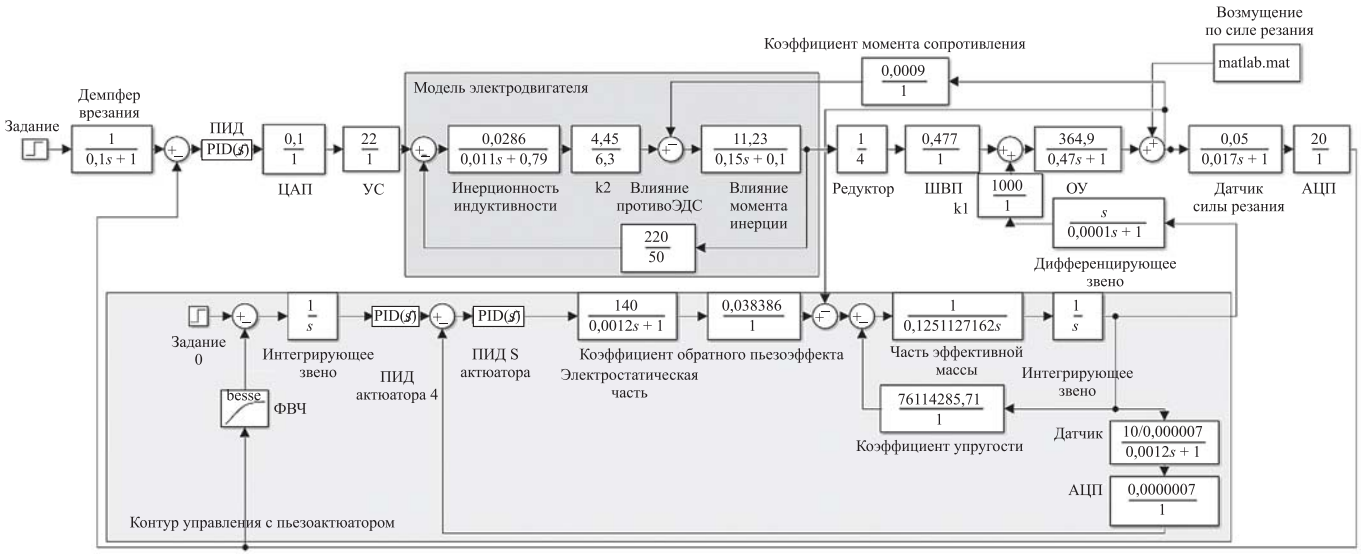


Рис. 2. Структурная схема исходной системы управления

спортным данным. Структурная схема системы управления в Simulink приведена на рис. 2, где k_1 — коэффициент масштабирования величины удлинения пьезоактюатора (метров в миллиметры), k_2 — коэффициент преобразования величины индуктивности в момент двигателя по типовой модели [4, с. 46].

Моделирование показало, что использование двух исполнительных механизмов позволило увеличить быстродействие системы управления. Полученное взаимное расположение АЧХ$_f$ замкнутой системы по возмущению и спектральной плотности возмущающего воздействия, находящейся в диапазоне от 0 до 8 Гц, показало, что частотный диапазон эффективной работы по АЧХ$_f$ расширился с 7 до 190 Гц. При этом дисперсия силы резания уменьшилась с 24,8 до 1,6 Н^2.

Недостатки исходной системы и постановка задачи работы. При математическом моделировании работы системы выявлено, что из-за малого диапазона перемещения пьезоэлемента, снижения его силового воздействия при понижении частоты управляющего сигнала при работе системы управления периодически происходит интегральное насыщение регулятора высокочастотного контура и длительное нахождение исполнительного механизма в крайних положениях (рис. 3). Это приводит к отсутствию в данные моменты управляющего воздействия с данного контура и резкому увеличению ширины коридора изменения силы резания в течение продолжительных промежутков времени (рис. 4), которое приводит к увеличению погрешности обработки.

Для обеспечения эффективной развязки контуров управления по частоте ставится задача произвести синтез системы управления, обеспечивающей эффективную развязку кон-

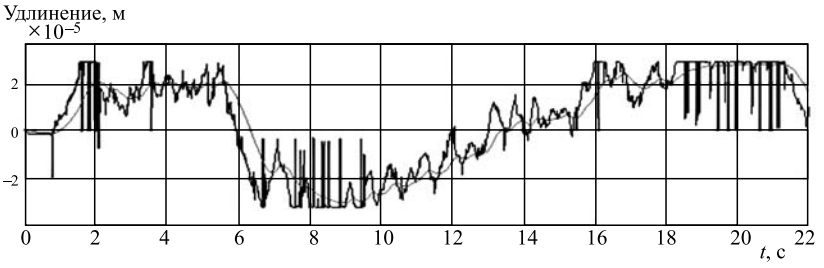


Рис. 3. Временные ряды:
— — изменения положения пьезоэлемента; --- — фильтра низких частот

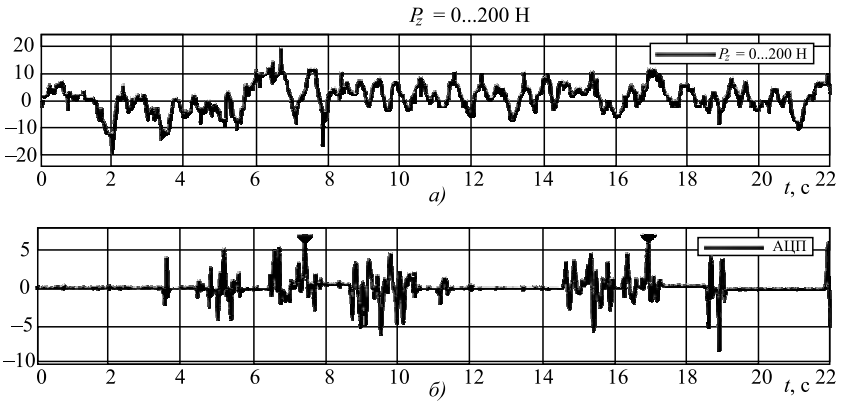


Рис. 4. Временной ряд возмущения на силу резания (*а*) и выхода системы управления с ФВЧ (*б*)

туров, не допуская интегрального насыщения контура с пьезоэлементом.

Функциональная и структурная схемы системы управления силой резания при токарной обработке, позволяющей обеспечить эффективную развязку контуров, не допуская интегрального насыщения контура с пьезоэлементом, представлены на рис. 5 и 6.

Данная система управления отличается введением дополнительного контура стабилизации среднего удлинения пьезоэлемента, выполняющего роль фильтра высоких частот быстродействующего контура вместо ФВЧ *12* в исходной системе (см. рис. 1).

Дополнительный контур содержит реализованные на компьютере низкочастотный фильтр *24* для определения текущего значения среднего отклонения удлинения пьезоэлемента от заданного положения, задатчик *25*, элемент сравнения *26* для получения ошибки отклонения удлинения пьезоэлемента от заданного значения, дифференцирующую цепочку *27* для преобразования сигнала, пропорционального положению режущего инструмента, в сигнал, пропорциональный скорости его изменения (подаче), регулятор *28* для определения управляющего воздействия, которое в виде поправки прибавляется к заданному значению, фор-

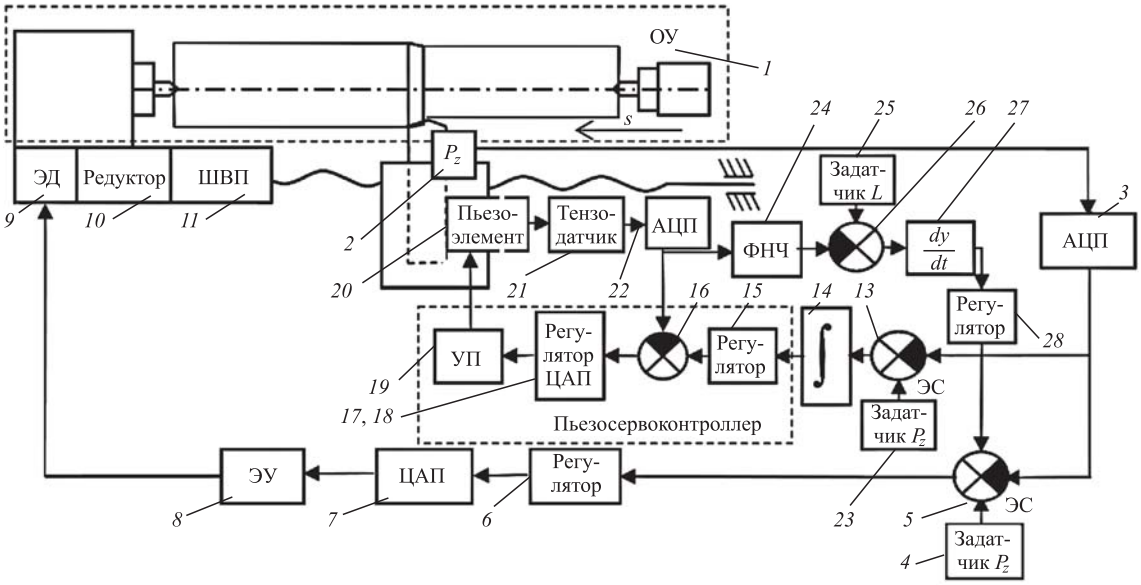


Рис. 5. Функциональная схема рассматриваемой системы управления силой резания с двумя исполнительными механизмами

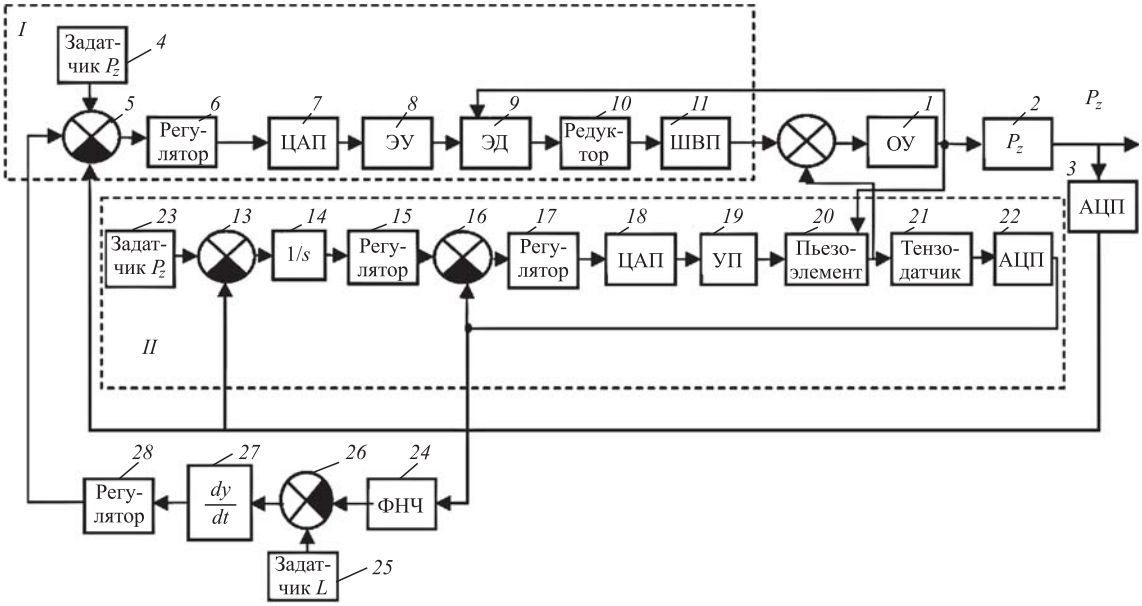


Рис. 6. Структурная схема рассматриваемой системы управления силой резания с двумя исполнительными механизмами

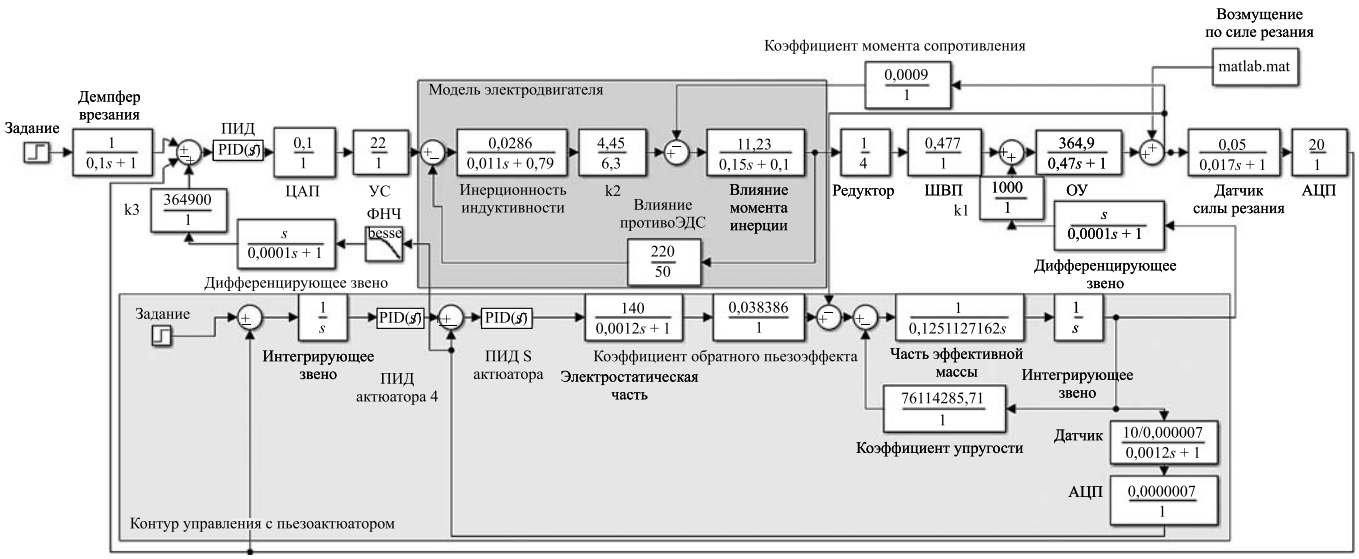


Рис. 7. Структурная схема рассматриваемой системы управления

мируемому задатчиком *4* низкочастотного контура управления силой резания, что приводит к низкочастотной корректировке подачи и возврату удлинения пьезоэлемента в среднее положение. Структурная схема системы управления в Simulink приведена на рис. 7, где k_3 — коэффициент масштабирования величины пропорциональной скорости удлинения пьезоактюатора в величину, пропорциональную силе резания.

Контур управления средним удлинением пьезоэлемента уменьшает влияние низкочастотных возмущений на положение подвижного торца пьезоэлемента, устраняя его смещение и не допуская длительное нахождение в крайних положениях. Это означает, что данный контур не пропускает низкочастотные возмущения на объект управления, т. е. отфильтровывает их влияние по аналогии фильтра пробки низких частот, играя при этом роль фильтра высоких частот для высокочастотного контура управления силой резания с исполнительным механизмом на основе пьезоэлемента. Это позволяет исключить фильтр высоких частот высокочастотного контура и устранить проблемы, связанные с выбором его структуры, параметров настройки, изменения параметров при изменении спектра возмущающих воздействий. Кроме того, проблема настройки фильтра высоких частот заменяется типовыми методиками настройки системы управления средним удлинением пьезоэлемента с обратной связью. При этом автоматически формируются частотные характеристики низкочастотного и высокочастотного контуров, так как они определяются частотной характеристикой замкнутой системы управления текущим удлинением пьезоэлемента, которая разделяет зоны эффективной работы низкочастотного контура и зоны средних и высоких частот данной системы, которые должны отрабатываться высокочастотным контуром.

Анализ эффективности системы управления. На рис. 8 приведены временные ряды регулируемой переменной для разомкнутой и замкнутой систем с двумя исполнительными механизмами и частотной развязкой, осуществляемой с помощью контура стабилизации низкочастотного удлинения пьезоэлемента в среднем положении.

Математическое моделирование показало, что система позволяет получить коэффициент эффективности по среднеквадратичному отклонению $K_{эф}$ = 25 и дисперсию силы резания на уровне 1 $Н^2$, против $K_{эф.исх}$ = 15,5 и дисперсии 1,6 $Н^2$ с локальными выбросами до 2,5 $Н^2$ у системы с ФВЧ. Показатели качества различных систем управления силой резания приведены в сравнительной таблице.

Кроме того, структура системы управления позволяет применять в качестве быстродействующего исполнительного механизма пьезоэлектрические микроактюаторы с диапазоном перемещения до трёх раз меньшим, чем у системы с ФВЧ, т. е. 35 мкм против 100 мкм. Следует отметить, что стоимость таких актюаторов может быть до двух и более раз меньшей, чем для актюатора исходной системы управления.

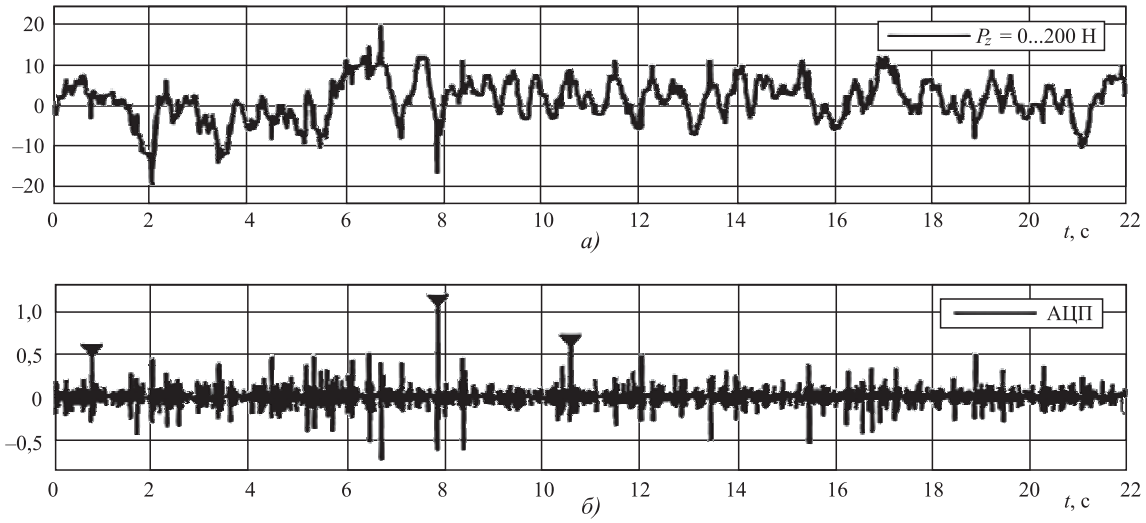


Рис. 8. Временные ряды возмущения на силу резания (*а*) и выхода системы управления (*б*)

Сравнительная таблица показателей качества систем управления

Тип системы регулирования силы резания	Дисперсия силы резания, $Н^2$	$K_{эф}$	Частотный диапазон эффективной работы, Гц
Без управления	24,80	1,00	—
Одноконтурная система [1]	4,24	5,80	3,1
Двухкаскадная система [1]	2,51	9,88	5,6
Трёхкаскадная система [1]	2,25	11,00	6,8
С пьезоактюатором и развязкой с помощью ФВЧ [2]	1,60	15,50	190
С пьезоактюатором и частотной развязкой с дополнительным контуром стабилизации среднего удлинения	1,00	24,80	190

Выводы. Проведены синтез и компьютерное моделирование двухконтурной системы управления силой резания с двумя исполнительными механизмами на одно управляющее воздействие и частотной развязкой контуров за счёт естественного фильтра низких частот, образуемого элементами контура с двигателем продольной подачи и объектом управления, а также применения дополнительного контура стабилизации среднего удлинения пьезоэлемента, играющего роль фильтра высоких частот. Способ реализации фильтра высокой частоты с помощью системы управления позволил обеспечить стабильную и эффективную работу системы управления при стохастических возмущающих воздействиях на силу резания.

Библиографические ссылки

1. **Мостовой В.Д., Бирюков В.П., Игнатьев А.А.** Разработка каскадной системы управления силой резания при токарной обработке // Сб. трудов науч.-практ. конф. БИТИ НИЯУ МИФИ II Всерос. науч.-практ. конф. «Энергоэффективность и энергосбережение» Т. 2. 2016. С. 79—83.

2. **Мостовой В.Д., Бирюков В.П.** Моделирование и обоснование эффективности двухконтурной системы управления процессом токарной обработки с использованием быстродействующего исполнительного механизма // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2017. № 2 (22). С. 205—221.

3. **Harms A., Denkena B., Lhermet N.** Tool adaptor for active vibration control in turning operations. ACTUATOR 2004/ 9th International Conference on New Actuators, 14—16 June 2004. Bremen, Germany. С. 694—697.

4. **Филлипс Ч., Харбор Р.** Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. 616 с.

Ссылка для цитирования

Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Реализация фильтра высокой частоты для развязки контуров управления силой резания по обратной связи // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 12. С. 544—549.

УДК 551.510.42+543.27

В.В. Буренин, канд. техн. наук, проф.
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет)
madi.1965@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Рассмотрены новые, отличающиеся улучшенными характеристиками конструкции фильтров и устройств для очистки и обезвреживания производственных сточных вод, предложенные в научно-технической и патентной литературе промышленно развитых стран. Показано, что процесс создания новых конструкций фильтров и устройств для эффективной очистки и обезвреживания сточных вод промышленных предприятий является составной частью технического прогресса и обусловлен всё возрастающими экологическими и санитарно-гигиеническими требованиями к очищенным сточным водам, сбрасываемым в природные водоёмы или на рельеф местности.

Ключевые слова: сточные воды; устройство; очистка; гидравлический фильтр; установка; обезвреживание; конструкция; защита окружающей среды; промышленное предприятие.

The new, features by improved characteristics, design of filters and devices for industrial sewage treatment and neutralizing, described in the scientific, technical and patent literature of industrialized countries, are considered. It is shown that the process of creating new designs of filters and devices for the effective sewage treatment and neutralization of industrial enterprises is an integral part of technological progress and is due to the increasing environmental and sanitary-hygienic requirements for treated wastewater discharged into natural water basins or on relief.

Keywords: sewage; device; cleaning; hydraulic filter; installation; neutralization; design; environmental protection; industrial enterprise.

Одно из основных требований современного производства — повышение экологической безопасности. Внедрение экологичных и ресурсосберегающих технологий, бессточного производства — наиболее эффективное средство охраны окружающей среды. Промышленные предприятия являются в настоящее время основным источником выбросов в окружающую среду большого объёма сточных вод. Для природы и человека недостаточно очищенные производственные сточные воды очень вредны. В них содержатся опасные для здоровья человека концентрации взвешенных и растворённых загрязняющих примесей различной природы: твёрдые и пластинчатые частицы, кислоты и щёлочи, соли, ионы разнообразных металлов, токсичные вещества, болезнетворные бактерии и др. Поэтому перед сбросом производственных сточных вод в канализацию, водоёмы, на рельеф местности или перед повторным их использованием на предприятиях они должны быть очищены, обезвружены и обеззаражены до предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ.

В зависимости от требования к качеству очищенной воды создаётся технологическая схема очистки производственных сточных вод, основу которой составляют механические и силовые виды очистки, предназначенные для задержания основной массы взвешенных твёрдых и пластинчатых частиц (песок, земля, механические частицы производственного происхождения и т. п.), а также для защиты от износа и забивания устройств и сооружений последующей обработки промышленных стоков. Технология очистки сточных вод от растворённых вредных примесей включает следующие способы очистки: адсорбционный, абсорбционный, ионообменный, химический, термический, коагуляционный, флотационный, флокуляционный, биологический и др.

Конструкции фильтров для очистки сточных вод от взвешенных частиц загрязнений по принципу действия классифицируют на *механические*, в которых отделение взвешенных частиц загрязнений от жидкости происходит вследствие различия размеров этих частиц и проходных капиллярных каналов фильтрующих перегородок, и *силовые*, в которых очистка осуществляется за счёт использования силовых полей — гравитационного, инерционного, магнитного, электрического и др.

Конструктивно фильтрующие перегородки механических фильтров оформляются в виде стационарных сеток, пластин, пористых материалов, тканей и т. п., зернистых насыпных слоёв, а также в виде сменных патронов, кассет (фильтроэлементов) и т. п.

В последние годы ведущие в области производства техники для очистки и обезвреживания сточных вод промышленных предприятий российские и зарубежные фирмы разработали, запатентовали и выпускают фильтры и устройства новых конструкций, отличающиеся улучшенными характеристиками [1].

Высокой степенью очистки сточных вод и большой производительностью отличается *механический щелевой фильтр* [2], содержащий корпус *3* (рис. 1) с входным *1* и выходным *5* патрубками и фильтрующий элемент, набранный из параллельно расположенных пластин, образующих пакеты *6*. Каждый пакет размещён на опоре (опоры на рис. 1 не показаны). Опоры пакетов *6* закреплены поярусно на внутренней поверхности корпуса *3*. Пластины в каждом пакете *6* размещены на равном расстоянии одна от другой и образуют фильтрующие щели, поперечный размер которых уменьшается по высоте корпуса *3*. В верхней части корпуса *3* выполнен патрубок *4* для подачи воздуха внутрь корпуса *3*, заполненного очищаемыми сточными водами, при очистке (регенерации) фильтрующего элемента. В стенке корпуса *3* в пределах каждого яруса смонтированы патрубки *7* для отвода загрязнённой промывочной жидкости. Под опорами пакетов *6* пластин каждого яруса, за исключением нижнего яруса, установлены непроницаемые для жидкой среды экраны *2*, способствующие разделению грязевого потока промывочной жидкости от фильтрующих щелей с направлением одной части на выпуск через соответствующий патрубок *7* яруса, а другой — в турбулизированном виде на пакет *6* пластин нижерасположенного яруса.

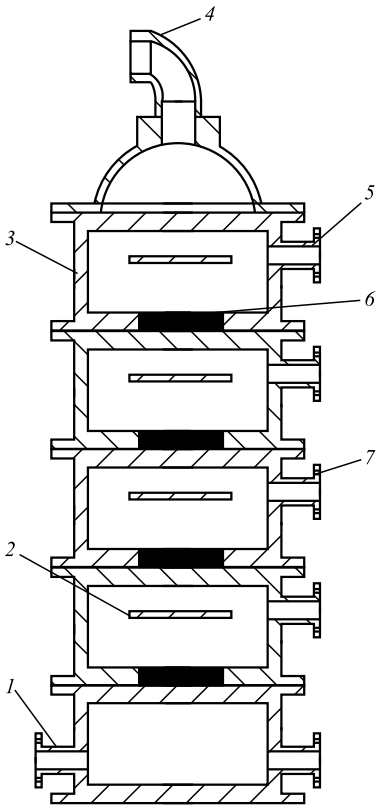


Рис. 1. Механический щелевой фильтр для очистки сточных вод с фильтрующим элементом, набранным из параллельно расположенных пластин

Очищаемые сточные воды подаются внутрь корпуса *3* через входной патрубок *1* и в виде ламинарного потока подвергаются многоступенчатой очистке, проходя через фильтрующие щели, образованные пластинами каждого пакета *6*. При этом наиболее крупные частицы загрязнений задерживаются на входах фильтрующих щелей пакета *6* пластин нижнего яруса с последующим уменьшением крупности задержанных частиц загрязнений по высоте корпуса *3*. Очищенные сточные воды отводятся через выходной патрубок *5*.

При засорении фильтрующих щелей их регенерация осуществляется обратным током очищаемых сточных вод под воздействием воздуха, подаваемого под давлением через патрубок *4* при закрытых патрубках *1* и *5* с отводом загрязнённой промывочной жидкости пофракционно через патрубки *7*, поочерёдно открываемые на каждом ярусе. Механический щелевой фильтр удобен в эксплуатации и надёжен в работе.

Для качественной очистки производственных сточных вод от взвешенных частиц загрязнений разработаны *керамические фильтрующие элементы* [3] для механических фильтров с большим ресурсом работы. Фильтрующие элементы изготавливаются на основе природного алюмосиликатного и техногенного сырья с определённым соотношением входящих компонентов. Механические фильтры с разработанными керамическими фильтрующими элементами технологичны в производстве и удобны эксплуатации.

Увеличенным ресурсом работы и удобством эксплуатации отличается *механический фильтр* [4] для очистки производственных сточных вод от взвешенных твёрдых и пластинчатых частиц загрязнений, содержащий корпус со штуцерами: для входа загрязнённых сточных вод,

для выхода очищенных сточных вод, обратной промывки и дренажный; верхнюю и нижнюю опорные плиты, в сквозных соосных отверстиях которых установлены фильтрующие щелевые элементы трубчатой формы, узел позиционирования фильтрующих элементов, переключающий режим работы фильтра с фильтрования на регенерацию и наоборот, шаровые краны с электромагнитным приводом и датчики давления. Переход режима работы фильтра с фильтрования загрязнённых сточных вод на регенерацию фильтрующих элементов происходит автоматически в зависимости от степени загрязнения фильтрующих элементов.

Силовая очистка, как и механическая, служит для удаления крупнодисперсных взвесей и обычно используется в качестве первой стадии в общей системе очистки. Фильтрация жидкости силовым способом осуществляется за счёт действия силовых полей — гравитационного, центробежного, магнитного, электрического и др.

Технологично в изготовлении и отличается повышенной эффективностью силовой очистки сточных вод от взвешенных частиц и всплывающих примесей *устройство* [5], содержащее трубопровод *8* (рис. 2) для подвода сточных вод на очистку тангенциально, цилиндрический корпус *13*, внутри которого коаксиально расположена цилиндрическая камера хлопьеобразования *10*, переходящая в нижней части в усечённый конус, зону отстаивания, включающую в себя камеру очистки *12* и камеру доочистки *3*. Камеры *12* и *3* охватывают выступающую наружу из корпуса *13* часть камеры *10* с образованием у зоны отстаивания формы правильной прямой призмы. Зона отстаивания основанием герметично соединена с корпусом *13* устройства и с камерой *10* по

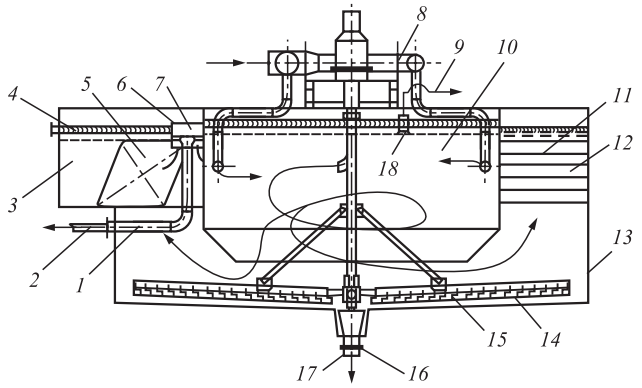


Рис. 2. Устройство для силовой очистки сточных вод от взвешенных частиц и всплывающих примесей с наклонными осадительными элементами

длине их окружностей. Камера *12* не имеет дна внутри корпуса *13* устройства и представляет собой наклонную прямоугольную в сечении призму с вертикальными внутренними наружными стенками с высотой, превышающей уровень сточных вод в камере *12*. В камере *12* размещены наклонные тонкослойные осадительные элементы *5* и *11* с высотой, не превышающей уровень сточных вод в камере *12*.

При работе устройства в камере хлопьеобразования *10* очищаемым сточным водам придаётся вращательное движение с перемешиванием по спирали сверху вниз, а выпадающие примеси собираются на днище *14*. Всплывающие примеси собираются на поверхности жидкости в камере *10*, откуда убираются с помощью лотка *18* и трубопроводной системы *9*. Из камеры хлопьеобразования *10* очищаемые сточные воды перемещаются в радиальном направлении и поступают в камеру очистки *12*, где движутся снизу вверх, проходя по каналам между наклонными тонкослойными осадительными элементами *11*. Здесь происходит дальнейшее разделение осаждающихся и всплывающих примесей. Осаждающиеся примеси самопроизвольно сползают по наклонным элементам *11* на днище *14*, а всплывающие примеси перемещаются между элементами *11* вверх и собираются на поверхности осветлённой жидкости в камере очистки *12*.

Из камеры *12* осветлённая жидкость вместе с находящимся на её поверхности слоем всплывающих примесей медленно перемещается в горизонтальном направлении в камеру для доочистки *3*. Здесь происходит окончательное разделение осветлённой жидкости и плавающих примесей. Осветлённая жидкость проходит под погружным кольцом *6*, сливается в трубу-стояк *7* и выводится через патрубок *1* в систему *2*. Всплывающие примеси удерживаются кольцом *6*, после чего выводятся по трубопроводной системе *4*.

Осадок, выпавший на днище *14*, сгребает вращающийся скребковый механизм *15* к центру днища *14*. Затем осадок выводится через патрубок *16* в трубопроводную систему *17*.

Фирма Saint Dizzier (Франция) выпускает *пластинчатый фильтр-осадитель* марки Stoppol [6] для очистки сточных вод от взвешенных частиц загрязнений, имеющий цилиндрический корпус из стеклопластика диаметром 1 м и обеспечивающий расход по очищаемым сточным водам 30 л/с. Фильтр-осадитель отличается удобством эксплуатации и надёжностью в работе.

Среди различных видов загрязнений, содержащихся в сточных водах промышленных предприятий, нефть и нефтепродукты относятся к наиболее распространённым из опасных веществ, загрязняющих окружающую среду. Попадая с недостаточно очищенными и обезвреженными сточными водами в водные объекты или на рельеф местности, нефть и нефтепродукты создают различные формы опасных загрязнений [7].

Растворённые и эмульгированные в водоёмах нефтепродукты относятся к числу трудноокисляемых микроорганизмами веществ и делают воду непригодной даже для технического водоснабжения. Кроме того, эмульгированные в воде нефтепродукты и взвешенные твёрдые частицы загрязнений наносят повреждения жабрам рыб, обволакивают некоторые водные организмы, которые теряют способность к передвижению и погибают. Нефтепродукты, адсорбированные грунтом дна водоёма, нарушают биохимические процессы в водоёме, очень стойки к процессам самоочищения, а адсорбированные береговой почвой нефтепродукты могут вызвать пожары по берегам водоёмов [7].

Повышенной эффективностью отличается *устройство для сбора нефти* [8] с поверхности водного объекта (моря, реки, озера и т. д.), состоящее из ведущего барабана *5* (рис. 3), натяжного магнитного барабана *1*, транспортёра *4*, скребка *6*, магнитного сепаратора *7*, рамы жёсткости *3* с рёбрами жёсткости *2*.

Нефть на поверхности воды обрабатывают магнитным порошком и удаляют следующим образом. Судно *8* с установленным на нём устройством для сбора нефти, транспортной лентой с магнитным барабаном *1* и включенным движущимся транспортёром *4* подходит к кромке обработанной магнитным порошком нефти. Магнитный барабан *1* притягивает обработанную нефть своим магнитным полем и переносит с помощью транспортёра *4* на судно *8* к скребку *6*, с помощью которого намагниченная нефть сбрасывается в магнитный сепаратор *7*. В нём магнитный порошок отделяется от нефти, которая собирается в отдельную ёмкость, а магнитный порошок вновь подаётся на разлитую по поверхности воды нефть.

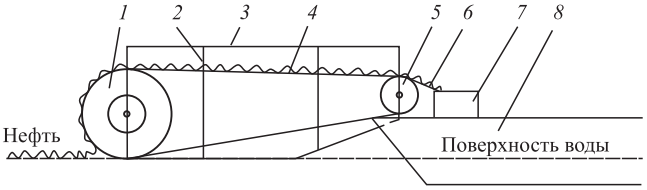


Рис. 3. Устройство с магнитным барабаном для сбора нефти с поверхности водного объекта

Устройство может применяться для очистки водных акваторий при аварийных разливах нефти и производственных сточных вод, загрязнённых нефтью и нефтепродуктами.

Сорбционная (адсорбционная и абсорбционная) очистка сточных вод применяется обычно как конечная операция после механической и силовой очисток для удаления растворённых загрязнений. Наиболее универсальные сорбционные методы — это фильтрование сточных вод через слой гранулированного активированного угля. Из неуглеродных применяют сорбенты естественного и искусственного происхождения.

К преимуществам сорбционной очистки относятся: возможность удаления различных загрязнений практически до любой остаточной концентрации независимо от их химической устойчивости, а также отсутствие вторичных загрязнений и управляемость процессом.

Для периодической адсорбционной очистки сточных вод от растворённых вредных веществ и газов предназначено *мобильное компактное устройство* [9] с увеличенной зоной регенерации адсорбента и контролируемой степенью очистки сточных вод. Сточные воды на очистку подают периодически в бак *3* (рис. 4) прямоугольного поперечного сечения. В нижней части бака находится опорная плита *6* с отверстиями (на рис. 4 не показаны) для прохода воздуха. На плите *6* расположены зёрна адсорбента в виде слоя, обладающего спо-

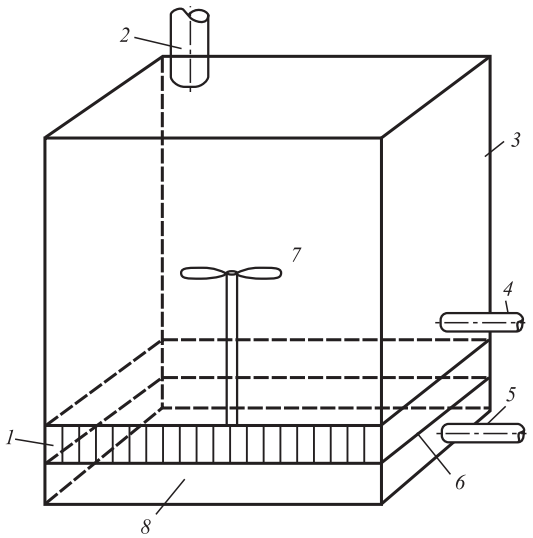


Рис. 4. Мобильное компактное устройство для адсорбционной очистки сточных вод с лопастной мешалкой

собностью к электрохимической регенерации, а под плитой *6* находится камера *8* для приёма и распределения по отверстиям плиты воздуха, подаваемого под давлением по трубе *5*. На противоположных длинных сторонах плиты *6* прямоугольной формы расположены электроды *1* виде стенок для адсорбента. Перемешивание зёрен адсорбента и очищаемых сточных вод в баке *3* осуществляется с помощью лопастной мешалки *7* и воздуха, подаваемого в отверстия плиты *6*. Адсорбент забирает из сточных вод загрязнения, которые прикрепляются к поверхности зёрен адсорбента. По истечении определённого времени перемешивание сточных вод и зёрен адсорбента останавливают, в результате чего зёрна адсорбента осаждаются на плиту *6* между электродами *1*. Очищенные сточные воды выводятся из бака *3* через трубопровод *4*.

Регенерация адсорбента осуществляется пропусканием электрического тока через слой адсорбента между электродами *1*. При этом высвобождаются адсорбированные загрязнения в форме углеродсодержащих газов и паров сточных вод, которые выходят через трубопровод *2*. Затем подаётся новая порция сточных вод на чистку в бак *3*. Такая последовательность очистки сточных вод может повторяться много раз. Устройство для адсорбционной очистки сточных вод удобно в эксплуатации и транспортировке.

Разработан *способ очистки* [10], позволяющий эффективно очищать производственные сточные воды малых объёмов от взвешенных твёрдых и пластичных частиц загрязнений, ионов тяжёлых металлов и других растворённых веществ с использованием углеродных волокнистых материалов. Способ включает одновременную фильтрацию и сорбцию очищаемых сточных вод в одном аппарате-фильтре с заданной скоростью очистки через слой угольноволокнистого сорбционно-фильтрующего материала. Оптимальную скорость пропускания очищаемых сточных вод через фильтр, вид фильтрующего материала и количество его слоёв устанавливают исходя из требуемой степени очистки и исходной концентрации вредных примесей в сточных водах.

Установлено, что некоторые образцы торфа проявляют сорбционную активность по отношению к нефти и нефтепродуктам, содержащимся в производственных сточных водах [11]. Разработанная установка для очистки нефтесодержащих сточных вод на тепловых электрических станциях позволила решить проблему утилизации отработанного сорбента — торфа путём его сжигания с получением дополнительного количества тепла.

Очистка производственных сточных вод с помощью активированного угля, синтетических ионообменных смол и адсорбентов синтетического происхождения неэкономична [12]. Поэтому для удаления из сточных вод ионов тяжёлых металлов, нефти и нефтепродуктов, фенолов, поверхностно-активных соединений, красителей и других подобных загрязнений перспективно применение природного адсорбента — диатомита, достоинствами которого являются: высокая степень очистки, отсутствие отходов, стабильность степени очистки при неожиданных выбросах загрязнений и экономичность, связанная с многократным использованием адсорбента после регенерации.

Природный диатомит — осадистая кремнистая порода от бледно-жёлтого до серого цвета, сложенная аморфным кремнезёмом (опалом), с содержанием глинистых включений до 20 %. Материал имеет в основном макропористую структуру, а поры с радиусом 4...40 мкм составляют лишь 15 % суммарного объёма пор.

Термическое и химическое модифицирование природного диатомита значительно улучшает его адсорбционные свойства по отношению к ионам тяжёлых металлов, нефти и нефтепродуктам.

При термическом модифицировании природного диатомита сульфатом алюминия значения максимальной адсорбции и удельной поверхности увеличиваются в 4,5 раза. Модифицированный сульфатом алюминия природный диатомит наиболее эффективен при очистке производственных сточных вод от нефти, нефтепродуктов, ионов меди и цинка.

Современные нормативные требования к обеззараживанию сточных вод с помощью хлорсодержащих реагентов требуют наличия обязательной стадии дехлорирования. В современных условиях альтернативным решением являются физические методы обеззараживания сточных вод. Наиболее эффективным и широко применяемым является *метод ультрафиолетового облучения* сточных вод на длине волны 253,7 нм с использованием амальгамных ламп низкого давления [13]. Данный метод характеризуется высокой эффективностью обеззараживания в отношении всех типов микроорганизмов, включая вирусы, отсутствием негативного влияния на окружающую среду и образования в сточных водах побоч-

ных продуктов обеззараживания, а также компактностью оборудования. Проведённое технико-экономическое сравнение двух методов обеззараживания (с использованием хлорсодержащего реагента и ультрафиолетового излучения) показало, что метод ультрафиолетового обеззараживания является экономически более эффективным. Абсолютная величина годового экономического эффекта от применения оборудования ультрафиолетового обеззараживания сточных вод растёт с увеличением производительности сооружений за счёт существенного снижения эксплуатационных расходов даже при незначительном увеличении объёмов обеззараживаемых сточных вод.

Из электрохимических способов очистки производственных сточных вод от мелкодисперсных и органических вредных примесей, эмульсий, нефтепродуктов, хроматов и фосфатов наибольшее распространение получил *метод электрокоагуляции* [14]. Для осуществления процесса электрокоагуляции в очищаемые сточные воды вместо коагулянтов вводят ионы тяжёлых металлов, полученные электрохимическим путём. Для этого сточные воды пропускают через электролизер — аппарат с опущенными в него электродами (анодом и катодом). При использовании в качестве анода железных и алюминиевых электродов происходит их электролитическое растворение, при котором в очищаемые сточные воды переходят ионы этих металлов, превращающиеся в их гидроксиды или соли, обладающие коагулирующей способностью. Процесс аналогичен обработке сточных вод соответствующими реагентами, однако при электрокоагуляции сточные воды не обогащаются сульфатами или хлоридами, содержание которых лимитируется при сбросе очищенных сточных вод в систему канализации, водоёмы, на рельеф местности или при использовании оборотных систем.

Для борьбы с отложениями солей жёсткости на электродах, а также для увеличения эффективности очистки сточных вод разработан *электрохимический коагулятор* [15], принцип действия которого основан на растворении анодного материала, а также воздействии вибраций на электроды и фильтрующую загрузку.

Электрохимический коагулятор, предназначенный для эффективной очистки производственных сточных вод от взвешенных веществ, сульфатов и ионов тяжёлых металлов, изображён на рис. 5. Коагулятор состоит из корпуса *2* в виде цилиндрического сосуда, заполненного силицированным кальцитом *1* в качестве фильтрующего материала загрузки. В объёме фильтрующей загрузки поочерёдно расположены алюминиевые *4* и графитовые *3* перфорированные диски. Перфорированные диски представляют собой электронную пару «алюминий—графит», являющуюся электрическим источником тока, который создаёт электрическое поле в объёме фильтрующего материала, способствующее протеканию процессов электрохимической коагуляции.

Вдоль вертикальной оси корпуса *2* коагулятора сквозь диски электродных пар проходит алюминиевый стержень *6*, верхним концом жёстко закреплённый на электромагнитном реле *5*, предназначенном для создания вибрации в объёме фильтра. Электродные пары (диски *3* и *4*) жёстко закреплены на стержне *6*.

В ходе очистки сточные воды поступают в корпус *2* через входной патрубок, проходят через фильтрующую загрузку и электрическое поле, созданное электрохимическими источниками тока, состоящими из замкнутых электродов. Электрохимические источники

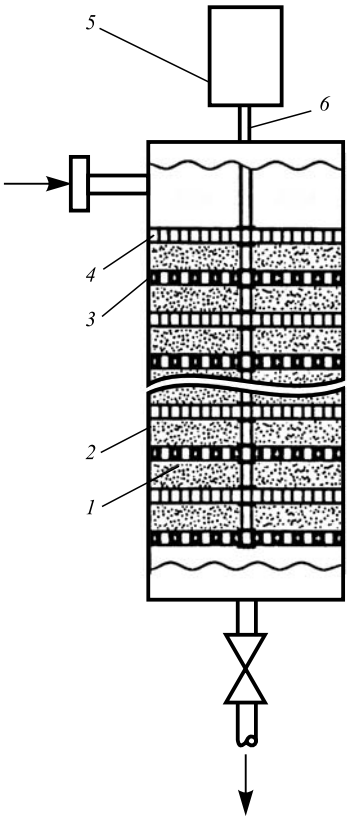


Рис. 5. Электрохимический коагулятор с фильтрующей загрузкой для очистки производственных сточных вод от взвешенных веществ, сульфатов и ионов тяжёлых металлов

тока расположены последовательно и выполнены из алюминиевого перфорированного диска *4*, имеющего отрицательный потенциал, и перфорированного графитового диска *3*, имеющего положительный потенциал. При этом алюминий растворяется, гидролизуется и образует коагулянт $Al(OH)_3$, формирующий на поверхности хлопья из зернистой загрузки.

Коагулянт и электрическое поле, поляризующее минеральные зёрна загрузки, способствуют образованию нерастворимых солей и их закреплению на зёрнах фильтрующего материала. При этом на электрохимические источники тока и на фильтрующую загрузку воздействует вибрация, создаваемая электромагнитным реле *5*. Включение вибрации в процесс очистки сточных вод в электрохимическом коагуляторе увеличивает эффект очистки и вносит положительный эффект при промывке коагулятора.

Разработанный электрохимический коагулятор имеет практическую значимость и используется для усовершенствования технологии очистки производственных сточных вод.

Важность удаления из производственных сточных вод, попадающих в водоёмы или на рельеф местности, биогенных элементов (соединений азота и фосфора) обусловлена возрастающей эвтрофикацией водоёмов, которая в значительной мере определяет экологическую ситуацию как в России, так и в других странах [16]. Для обеспечения требуемого качества очистки производственных сточных вод от азота и фосфора экономически целесообразно использование биологической очистки.

Биологический способ наиболее универсален для очистки сточных вод от органических загрязнений и заключается в их окислении микроорганизмами. Для обеспечения нормальной жизнедеятельности микроорганизмов требуются не только органические вещества, но и биогенные элементы (азот, кальций, фтор, хлор и др.).

Биологическую очистку производственных сточных вод промышленных предприятий ведут в аэро- и биофильтрах, аэротенках, биологических реакторах и прудах.

Низкую стоимость биологической очистки производственных сточных вод, содержащих органические соединения (примеси), обеспечивает *установка* [17], схема которой приведена на рис. 6. Сточные воды по трубопроводу *2* поступают на очистку в бескислородный резервуар *4*, где находятся анаэробные

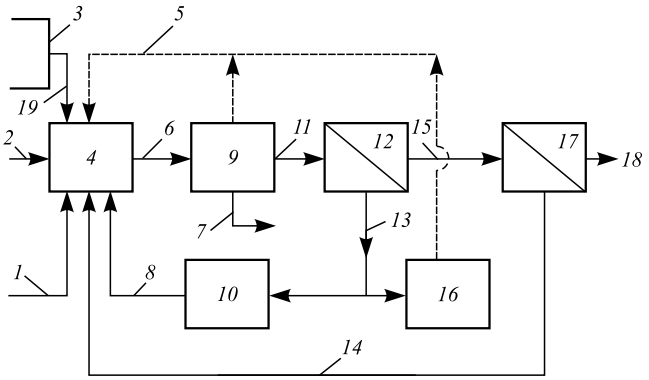


Рис. 6. Схема установки для биологической очистки производственных сточных вод, содержащих органические соединения

микроорганизмы и барботажное устройство для введения по трубопроводу *5* анаэробного газа. По трубопроводу из ёмкости *3* в резервуар *4* добавляют соединения, содержащие азот и фосфор, являющиеся основными питательными элементами для анаэробных микроорганизмов. Биологически обработанные сточные воды в резервуаре *4* по трубопроводу *6* подают в резервуар *9* анаэробной биологической очистки с принудительным слоем микроорганизмов, обеспечивающих высокоэффективное разложение примесей. Далее сточные воды из резервуара *9* поступают по трубопроводу *11* в резервуар *12* анаэробной биологической очистки, в котором имеется устройство разделения твёрдой и жидкой фаз (мембранный биореактор) с диффузионной трубкой для аэрации резервуара *12*. После резервуара *12* по трубопроводу *15* очищаемые сточные воды подают в мембранный сепаратор обратного осмоса *17* и разделяют на проникающую через обратноосмотическую мембрану очищенную воду, отводимую по трубопроводу *18*, и концентрированный способом обратного осмоса рассол, отводимый по трубопроводу *14* в резервуар *4* в качестве питательной среды для микроорганизмов. Кислород из очищаемых сточных вод, подаваемых в резервуар *4*, удаляется анаэробным газом, содержащим смесь метана, диоксида углерода и азота. Анаэробный газ отводится из резервуара *9* в резервуар *4* по трубопроводу *5*. При этом анаэробные микроорганизмы, которые размножались в резервуаре *9* с избытком, отводят по трубопроводу *7*. В резервуаре *12* анаэробные микроорганизмы быстро размножаются и их количество также становится избыточным. По этой причине для регулирования концентрации анаэробных микроорганизмов

их избыток отводится по трубопроводу *13* в резервуарах *16* или через устройство самобилизации *10* по трубопроводу *8* в резервуар *4*. Газовая смесь, содержащая метан и диоксид углерода, отводимая из резервуаров *9* и *16*, может быть рециркулирована в резервуар *4*.

Всё большее распространение во многих странах получило использование *фитоочистных сооружений* для очистки производственных сточных вод от растворённых вредных примесей [18]. Это объясняется тем, что такие очистительные сооружения, состоящие из элементов, аналогичных естественному природному ландшафту со встроенными техническими элементами, обладают весьма существенными преимуществами. В числе основных — обеспечение очистки производственных сточных вод от вредных примесей до нормативных требований за счёт использования растительно-бактериальных сообществ, высокая надёжность в течение длительного времени и низкие эксплуатационные затраты.

Несмотря на многочисленные отечественные и зарубежные разработки, успешную реализацию разноплановых систем и технологий очистки производственных сточных вод, организацию масштабного отечественного и зарубежного производства современного высококачественного очистного оборудования, сбросы недостаточно очищенных и обезвреженных производственных сточных вод продолжаются в водные объекты и на рельеф местности, являются экологически небезопасными и представляют угрозу здоровью и безопасности населения.

В промышленно развитых странах продолжается эффективная работа по созданию и внедрению в производство высокопроизводительных фильтров, обезвреживающих установок и устройств, отличающихся высокими технико-экономическими показателями для комплексной очистки сточных вод промышленных предприятий.

Библиографические ссылки

1. **Буренин В.В.** Новые гидравлические фильтры и устройства для очистки и обезвреживания производственных сточных вод // Экология и промышленность России. 2011. № 9. С. 8—11.

2. **Утин А.В., Петров В.Э., Ким А.Н.** Щелевой фильтр // Патент России № 253079. 2014. Бюл. № 28.

3. **Воробьёва В.В.** Керамические фильтры для многоступенчатой очистки промышленных и бытовых стоков // Новые огнеупоры. 2010. № 12. С. 37—40.

4. **Большоков В.А., Супрулаев И.И., Пашков А.М.** и др. Фильтр щелевой автоматический // Патент России № 2336119. 2008. Бюл. № 29.

5. **Галкин Ю.А.** Аппарат для осветления жидкости // Патент России № 2492906. 2013. Бюл. № 26.

6. **Lyko H.** Filterund Abscheiderfürdie Regenwasserbweirtschaftungvon Verkehrsftächen // FiltrundSepar. 2014. № 5. P. 270—273.

7. **Боровкова Т.Н., Двадненко М.В., Лявина Е.Б.** Технология магнитно-жидкостной очистки сточных вод от нефтепродуктов // Экология и промышленность России. 2011. № 1. С. 20—22.

8. **Миргород Ю.А., Емельянов С.Г., Хотынюк С.С., Червяков Л.М.** Устройство для сбора нефти с поверхности воды // Патент России № 2533157. 2014. Бюл. № 32.

9. **Роберт Д.Т., Эдвард П.Л.** Очистка загрязнённых жидкостей // Патент России № 2531189. 2014. Бюл. № 29.

10. **Алибеков С.Я., Сютова А.И.** Сорбционная очистка хромосодержащих сточных вод. // Сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. «Новые задачи технических наук и пути их решения». Уфа, 20 дек. 2014 г. С. 3—6.

11. **Демичева Е.С.** Применение торфа при очистке нефтесодержащих сточных вод // Сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф. с международным участием «Малоотходные, ресурсосберегающие химические технологии и экологическая безопасность». Стерлитамак. 21—22 нояб. 2013. С. 40—41.

12. **Барчуков В.В., Чумаков М.Ю., Бузаева М.В., Климов Е.С.** Модифицирование природного диатомита для придания минералу сорбционных свойств // Безопасность жизнедеятельности. 2015. № 10. С. 31—36.

13. **Костюченко С.В., Баранов В.Л., Ткачев А.А.** Ультрафиолетовое излучение — современный способ обеззараживания сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 3. С. 36—42.

14. **Шихалева Е.П.** Метод электрохимического коагулирования для очистки сточных вод // Экология производства. 2012. № 4. С. 62—69.

15. **Назаров В.Д., Фурсов С.В.** Очистка природных и сточных вод от цветности и мутности // Экология и промышленность России. 2014. № 8. С. 4—7.

16. **Большаков М.Ю.** Обеспечение эффективного биологического удаления биогенных элементов на городских очистных сооружениях // Справочник эколога. 2014. № 11. С. 92—96.

17. **Масайо С., Казусиге К., Хироми С., Тосинобу И., Ацуси К., Масахиде Т.** Способ и установка очистки заводских сточных вод // Патент России № 251589. 2014. Бюл. № 14.

18. **Применение** фитосооружений для очистки сточных вод в различных климатических зонах // Вода Мад. 2015. № 1. С. 10—16.

Ссылка для цитирования

Буренин В.В. Современные способы и устройства для очистки сточных вод промышленных предприятий // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 12. С. 550—557.

УДК 681.513

Ц. Ху, Л. Чжан, Я. Мин, Ю.Ли
(Харбинский политехнический институт, Китай),
К. Шэнь, канд. техн. наук
(Пекинский политехнический институт, Китай)

shenkaichn@mail.ru

ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены особенности оценивания переменных состояния неопределённых систем с использованием фильтра Калмана и виртуальной модели. Для этого применён адаптивный нелинейный фильтр Калмана с самоорганизующейся моделью. Сформирован ансамбль критериев селекции алгоритма самоорганизации, позволяющий строить модели с необходимыми характеристиками. Предложено решение задачи оценивания погрешностей навигационной системы летательного аппарата. Проведено моделирование по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами Ц060К и КИНД34-059.

Ключевые слова: алгоритм оценивания; фильтр Калмана; неопределённая система; виртуальная модель; самоорганизация; критерии селекции; погрешности навигационных систем; летательный аппарат.

The features of estimating the variables states of uncertain systems by using Kalman filter and a virtual model are considered. For this, an adaptive non-linear Kalman filter with a self-organizing model is applied. An ensemble of criteria for the selection of a self-organization algorithm, which makes it possible to build models with the necessary characteristic is formed. A problem solution of the errors estimating for the aircraft navigation system is proposed. Modeling according to a laboratory experiment dates with navigation systems Ts060K and KIND34-059 is carried out.

Keywords: estimation algorithm; Kalman filter; uncertain system; virtual model; self-organization; selection criteria; errors of navigation systems; aircraft.

Введение. Для оценивания переменных состояния систем используют различные алгоритмы фильтрации [1, 2]. Одними из самых распространённых алгоритмов являются линейный фильтр Калмана и его адаптивные модификации [3]. Эффективное оценивание осуществляется при наличии достоверной статистической информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов, а также известной матрицы модели исследуемого процесса. При отсутствии достоверной априорной стохастической информации используют адаптивные алгоритмы оценивания [4], а для определения параметров матрицы модели применяют алгоритмы идентификации. Проблемы возникают в случае отсутствия априорной информации о структуре модели оцениваемого процесса. Такие системы названы неопределёнными.

Традиционные методы систем управления предполагают, что порядок модели объекта управления и её структура известны и в процессе функционирования системы не меняются. В действительности порядок реальных объектов в ряде случаев точно неизвестен. В работе [5] предложена концепция самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЭ), которая предполагает реализацию нескольких фильтров Калмана с моделями различного порядка. Их оценки подвергаются анализу и выбирается оптимальный порядок модели. Рассматриваемый набор априорных моделей в фильтрах Калмана ограничен. Другой подход [6] предполагает построение виртуальной модели неопределённой системы (ВМНС). Виртуальная модель строится исходя из предположения, что известна верхняя граница возможных значений порядка системы. Метод самоорганизации позволяет строить модели оптимальной сложности [7, 8], но структура модели сильно зависит от выбора базисных функций и использовать их для синтеза алгоритмов управления часто затруднительно. Решение задачи определения структуры, параметров и состояния объ-

ектов можно получить с помощью адаптивных наблюдателей. В стохастической постановке задачи оценки адаптивных наблюдателей будут смещёнными.

Недостатки и ограничения известных методов оценивания сужают области их применения. Поэтому статья посвящена исследованию особенностей оценивания неопределённых систем. В качестве примера рассмотрена задача оценивания погрешностей инерциальной навигационной системы (ИНС) летательного аппарата (ЛА). Для моделирования алгоритмов использованы данные лабораторного эксперимента с системой КИНД34-059.

Виртуальная модель неопределённой системы. Современное состояние вычислительной техники позволяет успешно реализовать сложные алгоритмы обработки информации на борту ЛА. В связи с этим весьма перспективным представляется подход к построению адаптивных самоорганизующихся систем управления. Концепция самоорганизующегося адаптивного алгоритма позволяет реализовать адаптивные системы управления с оперативной идентификацией объекта управления. Самоорганизующийся регулятор является динамическим блоком, основу которого составляет набор параллельно работающих фильтров различных порядков. В этом случае фильтры применяются для оценки состояния объектов управления из последовательно включённых интеграторов. Если такой объект содержит n интеграторов, то его уравнения имеют вид

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t), \tag{1}$$

$$y(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{x}(t) + \beta^0 u(t), \tag{2}$$

где $\mathbf{A}$ — $(n \times n)$-матрица системы; $\mathbf{x}$ — n-вектор состояния; $\mathbf{b}$, $\mathbf{c}$ — n-вектор; u — управление; y — выходная переменная; β^0 — коэффициент управления.

Порядок объекта заранее неизвестен и определяется в процессе функционирования системы управления. Для этой цели можно воспользоваться марковской моделью [5] объектов общего вида, так как переменные состояния модели непосредственно связаны с производными по времени измеряемой переменной объекта управления.

Рассмотрена новая модель для описания объектов управления с неопределённым порядком. Предполагается, что известна верхняя граница возможных значений порядка неопределённого объекта и имеются оценки значений достаточного числа производных по времени его измеряемой переменной. Порядок системы определяется числом переменных состояния, однозначно и полностью описывающих её свободные движения [5]. В этом случае формируется постоянное управление на периоде квантования, т. е.

$$u(t) = u(kT) = u_k, kT \leqslant t < (k+1)T, \tag{3}$$

где T — период квантования или период, когда на объект поступает управляющее воздействие (управление).

Дифференцируя уравнение (2) по времени с учётом уравнения (1), получим

$$\begin{gathered}
\dot{y}(t) = \mathbf{c}^T\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{c}^T\mathbf{b}u_k, \\
kT \leqslant t < (k+1)T, \\
\ddot{y}(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{A}\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{A}^2\mathbf{x}(t) + \mathbf{c}^T\mathbf{A}\mathbf{b}u_k, \\
kT \leqslant t < (k+1)T, \\
\ldots \\
y^i(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{A}^{i-1}\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{A}^i\mathbf{x}(t) + \mathbf{c}^T\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{b}u_k, \\
kT \leqslant t < (k+1)T.
\end{gathered} \tag{4}$$

Введём следующие обозначения: $y^0(t) = y^0[k|\tau]$, $\mathbf{x}(t) = [k|\tau]$, $\mathbf{x}[k|0] = \lim\limits_{t \to kT} \mathbf{x}(t)$, $\mathbf{x}[k|T] = \lim\limits_{t \to (k+1)T} \mathbf{x}(t)$. Тогда дифференцируя по τ вытекающее из уравнения (2) равенство $y^0[k|\tau] = \mathbf{c}^T\mathbf{x}[k|\tau] + \beta^0 u_k$ с учётом уравнения (1), получим

$$\begin{gathered}
y^i[k|\tau] = \mathbf{c}^T\mathbf{A}^i\mathbf{x}[k|\tau] + \mathbf{c}^T\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{b}u_k = \\
= \mathbf{c}^T\mathbf{A}^i\mathbf{x}[k|\tau] + \beta^i u_k.
\end{gathered} \tag{5}$$

Здесь коэффициенты $\beta^i = \mathbf{c}^T\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{b}, (i \geqslant 1)$ являются параметрами Маркова [5].

В качестве переменных состояния моделей неопределённых объектов используем переменные

$$\chi^i = \mathbf{c}^T\mathbf{A}^{i-1}\mathbf{x},\ i = 1, 2, \ldots,$$

число которых также не ограничено при любом порядке n объекта.

В соответствии с уравнением (5) получим

$$\chi^i[k|\tau] = y^{i-1}[k|\tau] - \beta^{i-1}u_k. \tag{6}$$

Учитывая, что $\dot{u}_k = 0$ при $kT \leqslant t < (k+1)T$, получим

$$\dot{\chi}^i(t) = y^i(t), kT \leqslant t < (k+1)T,\ \ k = 0, 1, 2, \ldots. \tag{7}$$

Производная по времени от i-й переменной $\chi^i(t)$ имеет вид

$$\dot{\chi}^i(t) = \chi^{i+1}(t) + \beta^i u_k, \quad i = 0, 1, 2, \ldots, k = 0, 1, 2, \ldots . \tag{8}$$

Используя теорему Кэли—Гамильтона, уравнение (1) в переменных $\chi^i(t)$ примет следующий вид:

$$\begin{aligned} &\dot{\chi}^i[k|\tau] = \chi^{i+1}[k|\tau] + \beta^i u_k, \; i = 1, 2, \ldots, n-1; \\ &\dot{\chi}^n[k|\tau] = -\sum_{i=1}^{n} \alpha_{i-1}\chi^i + \beta^n u_k; \\ &y[k|\tau] = \chi^1[k|\tau] + \beta^0 u_k, \end{aligned} \tag{9}$$

где α_i — коэффициент характеристического полинома

$$\mathbf{A}(\lambda) = \det(\lambda \mathbf{I}_n - \mathbf{A}) = \\ = \alpha_n \lambda^n + \alpha_{n-1}\lambda^{n-1} + \ldots + \alpha_1 \lambda + \alpha_0.$$

Если переменными состояния системы j-го порядка являются величины $\chi^1(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{A}\mathbf{x}(t)$, $\chi^2(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{A}^2\mathbf{x}(t), \ldots, \chi^j(t) = \mathbf{c}^T\mathbf{A}^j\mathbf{x}(t)$, то уравнения исследуемого имеют вид [5]

$$\dot{\overline{\chi}}^j(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -\alpha_0^j & -\alpha_1^j & \alpha_2^j & \cdots & \alpha_{j-1}^j \end{bmatrix} \overline{\chi}^j(t) + \begin{bmatrix} \beta^1 \\ \beta^2 \\ \cdots \\ \beta^{j-1} \\ \beta^j \end{bmatrix} u_k(t); \tag{10}$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \overline{\chi}^j(t) + \beta^0 u_k(t), \tag{11}$$

где вектор $\overline{\chi}^j = [\chi^1 \;\; \chi^2 \;\; \cdots \;\; \chi^j]^T$, $j = \overline{1, N}$.

Векторы $\overline{\chi}^{j-1}$ и $\overline{\chi}^j$ описываются следующими выражениями:

$$\overline{\chi}^{j-1} = \begin{bmatrix} \chi^1 \\ \chi^2 \\ \cdots \\ \chi^{j-1} \end{bmatrix}, \overline{\chi}^j = \begin{bmatrix} \chi^1 \\ \chi^1 \\ \cdots \\ \chi^{j-1} \\ \chi^j \end{bmatrix}.$$

Уравнения (10) и (11) являются виртуальной моделью, которая формально описывает все одномерные стационарные динамические объекты, с порядком, меньшим или равным N.

Коэффициенты и порядок виртуальной модели могут быть идентифицированы [9]. Оценивание состояния динамического объекта (1) и (2) проводится с помощью линейного фильтра Калмана (ЛФК) [10], в котором использована виртуальная модель оцениваемого процесса с идентифицированными параметрами.

Оценивание состояния нелинейных неопределённых систем. Пусть уравнение нелинейных неопределённых систем для вектора состояния имеет вид

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{\Phi}_k(\mathbf{x}_{k-1}) + \mathbf{w}_k, \tag{12}$$

где $\mathbf{x}_k$ — вектор состояния; $\mathbf{\Phi}_k(\mathbf{x}_{k-1})$ — матрица нелинейной модели, характеризующая динамику исследуемого процесса.

Часть вектора состояния измеряется:

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

где $\mathbf{z}_k$ — вектор измерений; $\mathbf{H}_k$ — матрица измерений; $\mathbf{w}_k$ и $\mathbf{v}_k$ — дискретные аналоги гауссовского белого шума с нулевыми математическими ожиданиями и матрицами ковариаций $\mathbf{Q}_k$ и $\mathbf{R}_k$ соответственно, некоррелированные между собой.

Уравнения нелинейного фильтра Калмана (НФК) имеют следующий вид [11]:

$$\begin{aligned} &\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} + \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})[\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k\hat{\mathbf{x}}_{k,k-1}]; \\ &\hat{\mathbf{x}}_{k,k-1} = \mathbf{\Phi}_{k,k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}); \\ &\mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1}) = \mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T[\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k,k-1}\mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k]^{-1}; \\ &\mathbf{P}_{k,k-1} = \frac{\partial \mathbf{\Phi}_{k,k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial \hat{\mathbf{x}}_{k-1}^T}\mathbf{P}_{k-1}\left[\frac{\partial \mathbf{\Phi}_{k,k-1}(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})}{\partial \mathbf{x}_{k-1}^T}\right]^T + \mathbf{Q}_k; \\ &\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})\mathbf{H}_k]\mathbf{P}_{k,k-1}, \end{aligned} \tag{14}$$

где $\mathbf{K}_k(\hat{\mathbf{x}}_{k-1})$ — матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана; $P_{k,\,k-1}$ — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; $\mathbf{P}_k$ — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания.

Реализация НФК предполагает линеаризацию модели оцениваемой системы с помощью ряда Тейлора, представление апостериорной плотности в виде набора дельта-функций или замену апостериорной плотности системой частных гауссовских плотностей, взятых с различными весами. В результате в НФК используются только линейные модели.

Использование нелинейных моделей в общем случае затруднительно, так как апосте-

риорная плотность вектора состояния не является гауссовской. Реализация НФК путём решения стохастического дифференциального уравнения в частных производных в форме Ито или Стратоновича сложна в практических приложениях [11]. При оценивании неопределённых систем в нелинейной постановке задачи возможно использование нескольких нелинейных фильтров Калмана. Однако реализация этого подхода так же, как и нейросетевых способов построения модели оцениваемой системы [10], требует больших вычислительных затрат и затруднительна особенно в условиях ограничений на борту ЛА. Поэтому для оценивания состояния нелинейных неопределённых систем применяется адаптивный НФК, в котором модель оцениваемого процесса строится в процессе полёта ЛА.

Для построения модели исследуемого процесса в работах [7, 8] использован подход самоорганизации, например, метод группового учёта аргументов (МГУА) [6, 7].

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

В алгоритме самоорганизации модель имеет вид [6]

$$M(x) = \sum_{i=1}^{L} a_i b_i(f_i, x), \qquad (15)$$

где L — число базисных функций; a_i — амплитуда; b_i — базисные функции из параметризованного множества F_M; f_i — частота; $F_M = \{a_i b_i(f_i, x) \mid i = \overline{1, L}\}$ — набор базисных функций.

Каждая базисная функция определяется в соответствии с двухмерным вектором параметров $(a_i, f_i)^T$.

Алгоритм самоорганизации может быть реализован на различных базисных функциях. В ансамбль критериев селекции включены следующие критерии [6]: критерий минимума смещения, критерий регулярности, критерий баланса, а также специальные критерии, например, критерий простоты модели, который имеет вид

$$\Pi = \sum_{i=1}^{L} \Delta(\kappa_i) \to \min, \qquad (16)$$

где Π — функция критерия простоты; $\Delta(\kappa_i) = \begin{cases} 1, \kappa_i > E; \\ 0, \kappa_i \leqslant E; \end{cases}$ E — коэффициент порога.

В качестве модели оптимальной сложности в алгоритме самоорганизации выбирается модель с меньшим числом аргументов при более простой базисной функции. Кроме того, использование в алгоритме для селекции моделей критериев степени наблюдаемости, идентифицируемости и управляемости [9, 11] позволяет получить модели с улучшенными качественными характеристиками. Алгоритм самоорганизации позволяет автоматически выделять наиболее значимые переменные состояния, которые используются в формируемой модели.

Экспериментальные исследования. Рассмотрена задача оценивания погрешностей ИНС возвращающегося в атмосферу ЛА. Использованы модели погрешностей ИНС при полёте ЛА на атмосферном участке. Эффективность использования ЛФК с виртуальной моделью показана с помощью данных лабораторного эксперимента с ИНС Ц060К, а НФК с улучшенной моделью, полученной алгоритмом самоорганизации со сформированным ансамблем критериев селекции, продемонстрирована с использованием данных лабораторного эксперимента с системой КИНД34-059.

При проведении эксперимента системы Ц060К и КИНД34-059 были установлены на неподвижном основании, поэтому выходной сигнал измерения скорости представлял собой погрешности системы. Оценка погрешностей Ц060К проведена с помощью ЛФК с традиционной и виртуальной моделью, а погрешности КИНД34-059 оценивались НФК с априорной нелинейной моделью, самоорганизующейся классической и улучшенной моделями МГУА.

Традиционная линейная математическая модель погрешностей ИНС, которая используется в фильтре Калмана, имеет вид

$$\begin{aligned}
&\delta \dot{V}_E = a_N \Phi_H - g\Phi_N + B_E; \\
&\delta \dot{V}_N = g\Phi_E - a_E \Phi_H + B_N; \\
&\dot{\Phi}_E = \varepsilon_E - \frac{\delta V_N}{R}; \\
&\dot{\Phi}_N = \varepsilon_N + \frac{\delta V_E}{R}; \\
&\dot{\Phi}_H = \varepsilon_H + \frac{\delta V_E}{R} \operatorname{tg}\varphi; \\
&\dot{\varepsilon}_E = -\mu\varepsilon_E + w_E(t); \\
&\dot{\varepsilon}_N = -\mu\varepsilon_N + w_N(t); \\
&\dot{\varepsilon}_H = -\mu\varepsilon_H + w_H(t),
\end{aligned} \qquad (17)$$

где δV_E, δV_N — погрешности в определении путевой скорости ЛА; B_E, B_N — смещение нулей акселерометров; a_E, a_N — ускорения ЛА; Φ_E, Φ_N, Φ_H — погрешности ориентации; ε_E, ε_N, ε_H — скорости дрейфа; φ — широта местоположения; ω_E, ω_N, ω_H — абсолютные угловые скорости; w_E, w_N, w_H — возмущающие внешние воздействия; μ — средняя частота случайного изменения дрейфа; R — радиус Земли; g — ускорения силы тяжести.

Априорная модель имеет невысокую точность, поэтому в ЛФК целесообразно использовать виртуальную модель. Результаты моделирования погрешностей Ц060К и оценки ЛФК с тестовой и виртуальной моделями представлены на рис. 1.

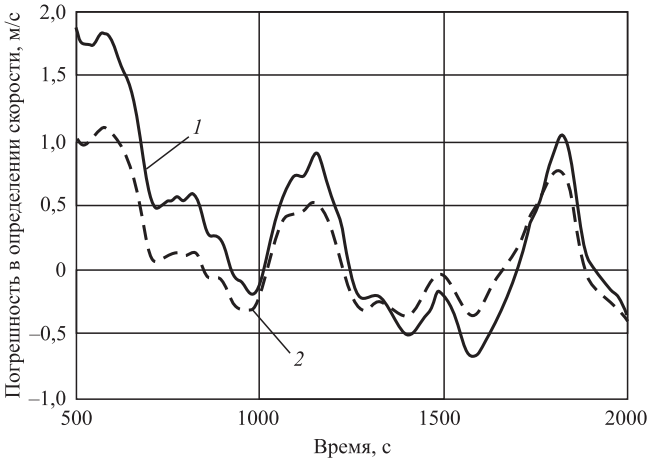


Рис. 1. Результат компенсации погрешности Ц060К с помощью ЛФК с тестовой и виртуальной моделями:
1 — ошибка после компенсации погрешности Ц060К с помощью ЛФК; *2* — ошибка после компенсации погрешности Ц060К с помощью ЛФК с виртуальной моделью

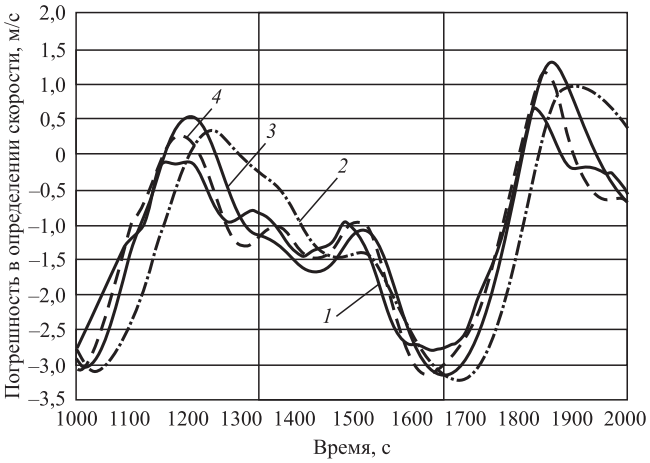


Рис. 2. Результат моделирования погрешностей КИНД34-059 и оценки НФК с МГУА:
1 — погрешность КИНД34-059 в определении скорости; *2* — оценки погрешности КИНД34-059 с НФК; *3* — оценки погрешности КИНД34-059 с НФК и МГУА; *4* — оценки погрешности КИНД34-059 с улучшенной моделью

В качестве модели в НФК использованы нелинейные уравнения ошибок ИНС для горизонтальных каналов [11]:

$$
\begin{aligned}
\delta\dot{V}_E &= -g\cos\Phi_E\sin\Phi_N + B_E;\\
\delta\dot{V}_N &= g\sin\Phi_E + B_N;\\
\dot{\Phi}_E &= \varepsilon_E\cos\Phi_N - \frac{\delta V_N}{R}\cos\Phi_N;\\
\dot{\Phi}_N &= \varepsilon_N + \frac{\delta V_E}{R};\\
\dot{\Phi}_H &= \varepsilon_H + \frac{\delta V_E}{R}\mathrm{tg}\varphi;\\
\dot{\varepsilon}_E &= -\mu\varepsilon_E + w_E(t);\\
\dot{\varepsilon}_N &= -\mu\varepsilon_N + w_N(t);\\
\dot{\varepsilon}_H &= -\mu\varepsilon_H + w_H(t).
\end{aligned}
\tag{18}
$$

Далее измеряется погрешность ИНС в определении скорости. Погрешности КИНД34-059 в определении скорости ЛА представлены на рис. 2.

По серии экспериментов оценки погрешностей КИНД34-059 в определении скорости при использовании в НФК улучшенной модели МГУА в среднем на 4...6 % точнее оценок НФК с классическим МГУА.

Заключение. Исследованы алгоритмы оценивания переменных состояния неопределённых систем. В линейной постановке задачи оценивания применён линейный фильтр Калмана с виртуальной моделью. Рассмотрены способ и особенности построения виртуальной модели неопределённой системы. В нелинейной постановке задачи рассмотрены способы реализации нелинейного фильтра Калмана и применён нелинейный фильтр Калмана с улучшенной моделью оцениваемого процесса. Нелинейная модель строится в процессе функционирования системы с помощью алгоритма МГУА, в котором использован ансамбль критериев селекции, дополненный критерием простоты модели и специальными качественными критериями. Работоспособность и точность алгоритмов оценивания продемонстрирована с помощью данных лабораторных экспериментов с навигационными системами Ц060К и КИНД34-059.

Библиографические ссылки

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

2. **Kalman R.E.** A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME. Ser. D, Journal of Basic Engeneering. Vol. 82. P. 35—45.

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

4. **Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С.** Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 18—24.

5. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н.** Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов. М.: Изд-во МГТУ, 2016. 666 с.

6. **Селезнева М.С., Шэнь Кай, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Динамический системный синтез алгоритмического обеспечения навигационного комплекса летательного аппарата // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 2. С. 36—42.

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

8. **Shen Kai, Proletarsky A.V., Neusypin K.A.** Algorithms of constructing models for compensating navigation systems of unmanned aerial vehicles // 2016 International Conference on Robotics and Automation Engineering. August 27—29, 2016. Jeju-Do, South Korea. P. 104—108.

9. **Шэнь Кай, Неусыпин К.А.** Исследование критериев степеней наблюдаемости, управляемости и идентифицируемости линейных динамических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. № 11. С. 723—731.

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

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

Ссылка для цитирования

Ху Ц., Чжан Л., Мин Я., Ли Ю., Шэнь К. Оценивание состояния неопределённых систем // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 12. С. 558—563.

Уважаемые читатели!

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

Требования к оформлению библиографических ссылок

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

УДК 517.5

Е.М. Волотов, канд. техн. наук, **С.В. Нестеров,** канд. техн. наук
(филиал «Взлёт» Московского авиационного института — национального университета),
А.Д. Евдокиенко, В.Н. Ломоносов, С.Б. Кокорина
(войсковая часть 15650, г. Ахтубинск),
Т.А. Волотова
(Ахтубинская кадетская школа-интернат им. П.О. Сухого)

volotovevgenii@gmail.com

МЕТОД ИНТЕРПОЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИЙ ПРИ ПОДГОТОВКЕ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ЛЁТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрена проблема интерполяции функций, заданных в виде графиков, при обработке материалов измерений, статистической обработке и математическом моделировании. Предложен новый метод решения данной задачи. Приведены общий вид интерполяционной формулы и порядок расчёта её коэффициентов. Проведён сравнительный анализ предлагаемого метода с методами классической интерполяции (формулами Лагранжа и Ньютона). Произведена оценка погрешности интерполирования и возможности применения предлагаемого метода для решения задач обратного интерполирования и аппроксимации сложных функций с несколькими переменными.

Применение разработанного метода интерполяции позволит перейти к выполнению расчётов с минимальными затратами времени на подготовку данных, что повышает оперативность анализа материалов лётных экспериментов.

Ключевые слова: обработка материалов измерений; интерполяция функций; задача обратного интерполирования; оценка погрешности интерполяции.

The problem of the function interpolation, defined in the form of graphs, at the processing of measurement materials, statistical processing and mathematical modeling is considered. A new method for solving this problem is proposed. The general form of the interpolation formula and the procedure for calculating its coefficients are given. A comparative analysis of the proposed method with classical interpolation methods (Lagrange and Newton formulas) is carried out. The error estimation of interpolation and the possibility of applying the proposed method to solve the problems of inverse interpolation and approximation of complex functions with several variables are carried out. The application of the developed interpolation method will allow proceeding to calculations with minimal time spent for data preparation, which increases the analysis efficiency of flight experiment materials.

Keywords: processing of measurement materials; function interpolation; back interpolation task; estimation of interpolation error.

Требования, предъявляемые к безопасности, эффективности лётных испытаний и срокам их проведения, предполагают, что система обработки полётной информации должна быть гибкой, оптимизированной по быстродействию вычислений с заданной точностью, позволяющей своевременно получать всю необходимую информацию для эффективного контроля и управления лётными экспериментами (ЛЭ) [1]. Обеспечение этих требований в системе обработки предполагает возможность достаточно просто и быстро вводить в вычислительную машину характеристики, поправки и коэффициенты, которые представлены в виде функций, а также вносить в них изменения.

При проведении ЛЭ регистрируется большое количество параметров. К ним относятся скорость, высота, перегрузки, угловые скорости, углы тангажа, крена, атаки, частота вращения роторов двигателей, отклонение органов управления, их шарнирные моменты, давление и температура в различных системах самолёта, деформация конструкции, амплитуда и частота вибраций элементов конструкции и т. д. [2].

Информационно-измерительная аппаратура регистрирует в полёте значения тока или напряжения, соответствующие физическим значениям измеряемых параметров. Такое соответствие задаётся с помощью градуировочных зависимостей, связывающих значения сигналов измерительных преобразователей и физические значения параметров. Эта связь может меняться при изменении условий ЛЭ и с течением времени. Градуировку измерительной аппаратуры повторяют регулярно через заданные техническими условиями сроки, при

изменении условий эксперимента, а также после устранения неисправностей аппаратуры.

В вычислительной машине градуировочные зависимости задаются различными способами: степенными полиномами, сплайнами, таблицами и т. д. [3—6]. Ограничение на выбор обусловлено, с одной стороны, стремлением сократить время расчёта каждого параметра, с другой стороны, возможным увеличением погрешности при расчёте. Немаловажное значение при этом имеет возможность оперативной замены градуировочных зависимостей.

Для оценки результатов ЛЭ помимо регистрируемых в полёте параметров необходимо анализировать параметры, непосредственно не измеряемые в эксперименте. При их расчётах используются аэродинамические поправки, коэффициенты аэродинамических сил и моментов, другие характеристики самолёта и его силовой установки, которые, как правило, представлены в виде графиков.

Критерии, показатели и другие материалы, характеризующие поведение и состояние самолёта, указывают в актах об испытаниях в виде графиков функций, аналитические выражения которых, как правило, не известны.

В настоящее время важную роль в процессе создания современных и перспективных самолётов играют математические модели их движения, которые совершенствуются в процессе испытаний и сопровождают самолёты данного типа в течение всего времени их эксплуатации. В этих моделях используются характеристики, поправки и коэффициенты, которые представлены в виде графиков. Аналитические выражения этих функций также не известны.

Графики сложных функциональных зависимостей, как правило, представляют в виде таблиц, в которых значения аргумента могут быть неравноотстоящими. Таблицы составляют таким образом, чтобы значения функции для аргументов, которых нет в таблице, могли быть определены с необходимой степенью точности посредством интерполяции.

Графики простейших функциональных зависимостей (функции одной переменной) аппроксимируют с помощью классических интерполяционных формул Лагранжа и Ньютона для неравноотстоящих значений аргумента [7—10]. Эти формулы представляют собой различную запись одного и того же алгебраического многочлена. Однако такое интерполирование с использованием большого числа узлов интерполяции часто приводит к неудовлетворительному приближению, что объясняется накоплением погрешностей в процессе вычислений. Кроме того, из-за расходимости процесса интерполяции увеличение числа узлов не обязательно приводит к повышению точности [11, 12]. В таких случаях применяют другие способы приближения функций и интерполирования, например, тригонометрическую интерполяцию, приближение рациональными функциями, дробно-линейную интерполяцию, интерполяцию сплайнами и т. д. [13—15]. Здесь возникает много вопросов. Какой способ выбрать? Как рационально выбрать узлы интерполирования? Будет ли интерполяционный процесс сходящимся? Какую выбрать схему вычисления коэффициентов? В целом поиск наилучшего приближения функций и интерполирования — сложный итерационный процесс, который не всегда обеспечивает достаточную гибкость систем обработки.

Рассмотрим некоторую функцию $y = f(x)$, заданную в виде графика, аналитическое выражение которой не известно. Для выполнения расчётов на вычислительной машине на основании графика функции составляется таблица, которая в общем случае представляет собой набор значений функции $y_1 = f(x_1)$, $y_2 = f(x_2)$, $y_3 = f(x_3)$, ..., $y_n = f(x_n)$ для последовательности неравноотстоящих значений аргумента x_1, x_2, x_3, ..., x_n.

Для нахождения аналитического выражения $F(x)$ функции, совпадающей в узлах интерполяции со значениями заданной функции, строится функция, являющаяся многочленом n-й степени:

$$\overline{f}(x) = a_0 x^n + a_1 x^{n-1} + \ldots + a_n, \qquad (1)$$

где $n + 1$ — число узлов интерполяции.

Классическими примерами многочленной интерполяции для случая неравноотстоящих узлов являются формулы интерполяционного полинома Лагранжа или многочлена Ньютона, построенного с помощью разделённых разностей. С точки зрения точности построения интерполирующего полинома эти многочлены согласно теореме о единственности многочленной интерполяции идентичны [16].

При большом количестве точек x_i, $i = \overline{0, n}$ интерполяция требует большой гладкости (по n-й производной), что практически выполнить невозможно. Поэтому сглаживание табличной функции осуществляют путём минимизации некоторого функционала, построенного с по-

мощью заданной таблицы и многочлена (1). В случае использования квадратичного функционала аппроксимация функции называется аппроксимацией с помощью точечного метода наименьших квадратов:

$$S(a_1, a_2, \ldots, a_m) = \sum_{i=0}^{n} [y_i - \overline{f}(x)]^2, \; m \ll n.$$

Стоит отметить, что на практике отыскание коэффициентов полинома (1) с помощью метода наименьших квадратов требует решения большого числа систем уравнений, что также делает его применение достаточно сложным [17].

Геометрическая задача интерполирования для функции одной переменной $y = f(x)$ означает построение кривой, проходящей через точки с координатами (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), ..., ..., (x_n, y_n) (рис. 1). Однако через данные точки можно провести бесчисленное множество

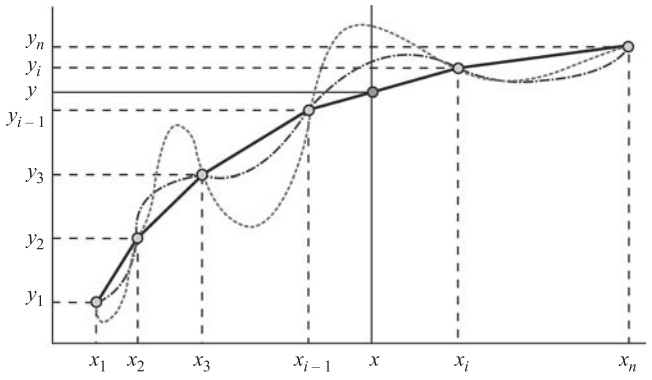


Рис. 1. Геометрический смысл интерполирования

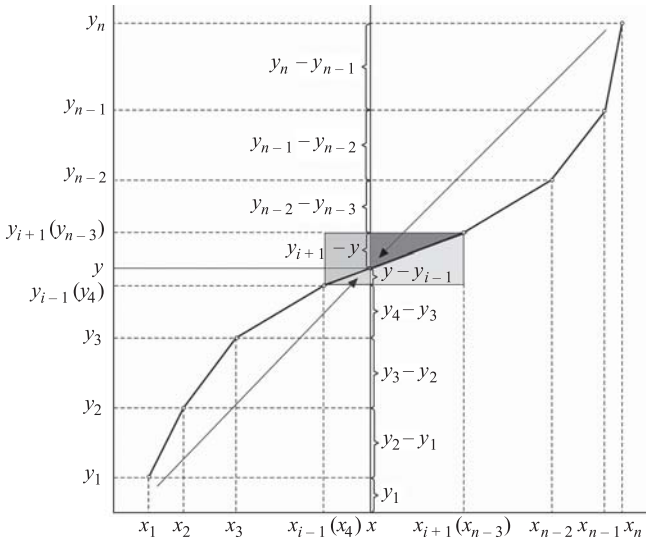


Рис. 2. График функции, обеспечивающей линейную интерполяцию

различных кривых, другими словами, задача отыскания функции $y = f(x)$ по конечному числу её значений слишком неопределённа. Эта задача становится однозначной, если в качестве интерполирующей функции $F(x)$ для функции $y = f(x)$ выбрать уравнение ломаной линии, т. е. предположить, что узловые точки соединены отрезками прямой линии.

Поэтому необходимо найти интерполяционную функцию $F(x)$ для функции $y = f(x)$ при условии, что неравноотстоящие узловые точки соединены отрезками прямых линий.

Итак, функция задана в виде графика. На графике произвольным образом выбираем узловые точки: (x_1, y_1), (x_2, y_2), ..., (x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i), ..., (x_{n-2}, y_{n-2}), (x_{n-1}, y_{n-1}), (x_n, y_n).

Основным условием выбора узловых точек является обеспечение необходимой точности при использовании интерполяционной формулы.

Выбранные узловые точки соединяем отрезками прямых линий. Получаем ломаную линию, уравнение которой и будет интерполяционной формулой, обеспечивающей линейную интерполяцию между соседними узлами.

Опуская процедуру вывода, основанную на вычислении значения функции путём суммирования «снизу» и «сверху» значений проекций, полученных из подобия треугольников, окончательно получаем интерполяционную формулу (уравнение ломаной, изображённой на рис. 2) для функции одной переменной:

$$\begin{aligned} y = a_0 + a_1|x - x_1| + a_2|x - x_2| + a_3|x - x_3| + \ldots + \\ + a_{n-1}|x - x_{n-1}| + a_n|x - x_n|, \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$a_0 = \frac{y_1 + y_n}{2}; \quad a_1 = \frac{1}{2}\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1};$$

$$a_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right); \; a_3 = \frac{1}{2}\left(\frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3} - \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}\right);$$

$$a_{n-1} = \frac{1}{2}\left(\frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}} - \frac{y_{n-1} - y_{n-2}}{x_{n-1} - x_{n-2}}\right); \; a_n = -\frac{1}{2}\frac{y_n - y_{n-1}}{x_n - x_{n-1}}.$$

Возникает вопрос, насколько близко интерполяционная функция $F_n(x)$ приближается к функции $y = f(x)$ в других точках, отличных от узловых, т. е. как велик остаточный член $R_n(x) = f(x) - F_n(x)$?

Для определения степени приближения необходимо, чтобы функция $y = f(x)$ на рассматриваемом интервале была непрерывна и имела, по крайней мере, первую производную $f'(x)$.

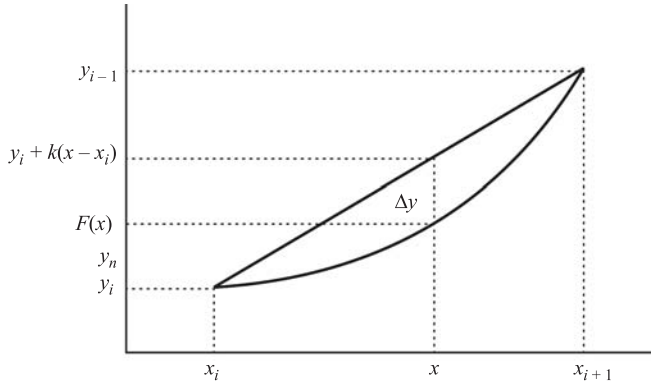


Рис. 3. Погрешность интерполяционной функции

Рассмотрим произвольно выбранный участок, ограниченный узловыми точками (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) (рис. 3).

Учитывая, что уравнение прямой, проходящей через узловые точки, имеет вид $u = y_i + k(x - x_i)$, абсолютную погрешность интерполирования для любого x можно определить по формуле

$$\Delta y = \left| f(x) - [y_i + k(x - x_i)] \right|. \quad (3)$$

Значение $x_{\Delta y\max}$, соответствующее максимальной абсолютной погрешности интерполирования, можно определить из условия равенства нулю первой производной выражения $f(x) - [y_i + k(x - x_i)]$:

$$f'(x) - k = 0, \quad (4)$$

где $k = \dfrac{y_{i+1} + y_i}{x_{i+1} + x_i}$.

Максимальное значение абсолютной погрешности составит

$$\Delta y_{\max} = \left| f(x_{\Delta y_{\max}}) - [y_i + k(x_{\Delta y_{\max}} - x_i)] \right|. \quad (5)$$

Задача оптимизации выбора узлов интерполирования состоит в том, что узловые точки должны выбираться так, чтобы абсолютная погрешность интерполирования не превышала заданную величину Δy.

Заданы функция $y = f(x)$ и её интерполяционная функция, полученная по новой формуле. Рассмотрим произвольно выбранный участок, ограниченный узловыми точками (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}), при этом координаты узловой точки (x_i, y_i) известны. Необходимо найти координаты следующей узловой точки (x_{i+1}, y_{i+1}) так, чтобы погрешность интерполирования не превышала максимально заданную величину Δy.

Учитывая выражения (3), (4) и (5), определяем значение функции при $x = x_{\Delta y\max}$. Зная, что значение функции в узловых точках совпадает с интерполированными, можно записать:

$$y_i + k(x_{i+1} - x_i) = f(x_{i+1}).$$

Решив это уравнение относительно (x_{i+1}) и подставив полученное значение в уравнение $u = y_i + k(x - x_i)$, получим координаты искомой узловой точки.

Следует отметить, что такой способ оптимального выбора узловых точек достаточно сложен из-за необходимости решения неявно заданных уравнений. Поэтому на практике гораздо удобнее выбирать точки «на глаз», разбивая график функции на небольшие участки, мало отличающиеся от прямолинейных, а затем определять погрешность.

Задача обратного интерполирования, заключающаяся в определении по заданному значению функции y соответствующего значения аргумента x, также может быть решена с помощью представленной интерполяционной формулы. Для этого достаточно принять переменную y за независимую и записать формулу, выражающую x, как функцию.

Сравнивая результаты интерполирования некоторых функций, заданных графиком, применяя классическую интерполяционную формулу Лагранжа и предлагаемую формулу, можно сделать следующие выводы:

в узловых точках результаты расчёта во всех вариантах совпадают;

результаты расчёта по новой интерполяционной формуле совпадают с результатами расчёта по формуле линейной интерполяции;

результаты расчёта по интерполяционной формуле Лагранжа в точках, отличных от узловых, отличаются от результатов расчёта по формуле линейной интерполяции, на концах участка имеют место существенные «выбросы», что практически делает интерполяционную функцию Лагранжа неприменимой к рассматриваемым задачам.

Сравнивая результаты прямого и обратного интерполирования с применением предлагаемой интерполяционной формулы, можно сделать вывод о полном совпадении полученных значений, в отличие от классических формул.

Предлагаемая интерполяционная формула решает проблему интерполирования функции

двух переменных, заданной в виде графика или таблицы, т. е. нахождение её нетабличных значений путём последовательной интерполяции каждой переменной x и y в отдельности.

Таким образом, применение предлагаемого метода интерполяции функций для подготовки алгоритмов и программ обработки материалов лётных экспериментов показало своё преимущество перед рассматриваемыми в статье классическими методами, так как:

не требует выбора наиболее удобного вида построения интерполяционной функции для каждого конкретного случая;

имеет упрощённый порядок выбора узловых точек;

обеспечивает совпадение значения функции с интерполированным в узловых точках, а между ними всегда обеспечивает заданную точность линейной интерполяции;

имеет простой расчёт коэффициентов;

присутствие в формуле только простых арифметических действий обеспечивает относительную быстроту расчёта;

позволяет интерполировать импульсные и подобные им функции;

применим для сложных зависимостей с несколькими переменными путём интерполирования по каждой переменной в отдельности;

позволяет перейти к выполнению расчётов с минимальными затратами времени на подготовку.

Библиографические ссылки

1. **Чернуха В.Н., Новокшонов Ю.В., Пляскота С.И.** Основы испытаний авиационной техники: учеб. пособие. Ч. II. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1994. 334 с.

2. **Пашковский И.М.** Динамика и управляемость самолета. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1987. 186 с.

3. **Демидович Б.П., Марон И.А.** Основы вычислительной математики. 4-е изд. М.: Наука, 1970. 497 с.

4. **Марчук Г.И.** Методы вычислительной математики. 2-е изд. М.: Наука, 1980. 536 с.

5. **Блейхут Р.** Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1989. 448 с.

6. **Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л.** Численные методы. 2-е изд. М.: Физматлит, 2006. 400 с.

7. **Магарил-Ильяев Г.Г.** Оптимальная интерполяция и принцип Лагранжа // Владикавказский математический журнал. 2004. Т. 6. № 4. С. 42—47.

8. **Марахин Е.Ю., Беляева А.С.** Интерполяция траектории движения при контурном управлении с использованием полинома Лагранжа // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2014. № 12 (102). С. 134—136.

9. **Мастяева А.М., Жуков А.Д., Димитренко Е.В.** Интерполяция функций полинома Лагранжа / В сб.: Информационные технологии в науке нового времени. 2016. С. 14—16.

10. **Романова Н.А., Домрачева Т.С., Гусев И.В., Гусев В.В., Христофоров Р.П.** Интерполяция функций с использованием многочлена Ньютона // Вестник современных исследований. 2018. № 7.1 (22). С. 348—355.

11. **Наумкина К.О.** Исследование зависимости точности нахождения значения функции от количества экспериментальных точек при интерполяции полиномом Ньютона // Studium. 2016. № 4—2 (41). С. 40.

12. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 822 с.

13. **Синкевич Г.И.** История методов сходящихся последовательностей и вложенных отрезков // История науки и техники. 2016. № 3. С. 3—14.

14. **Сабурова В.И.** Функции Бесселя и их свойства // Молодой учёный. 2017. № 45 (179). С. 4—8.

15. **Додонов Н.Ю., Жук В.В.** Об остаточных членах формул численного дифференцирования типа Стирлинга // Математический вестник педвузов и университетов Волго-Вятского региона. 2013. № 15. С. 71—77.

16. **Бронштейн И.Н., Семендяев К.А.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправл. М.: Наука, 1986. 544 с.

17. **Выгодский М.Я.** Справочник по высшей математике. М.: Астрель, 2006. 991 с.

Ссылка для цитирования

Волотов Е.М., Нестеров С.В., Евдокиенко А.Д., Ломоносов В.Н., Кокорина С.Б., Волотова Т.А. Метод интерполирования функций при подготовке алгоритмов и программ обработки материалов лётных экспериментов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 12. С. 564—568.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации, можно найти на сайте www.mashin.ru.

УДК 621.382.2

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

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ФИТООБЛУЧАТЕЛИ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННОГО СПЕКТРА

Представлены результаты фотобиологических исследований, цель которых заключалась в определении предпочтительных требований к спектру фитооблучателей в экспериментальной исследовательской гидропонной установке для светокультуры растений на основе светодиодов комбинированного спектра излучения с учётом видовых особенностей конкретных культур и задач выращивания. Дана оценка влияния спектральных составов фитооблучателей на основе светодиодов на продуктивность (биомассу) зелёной культуры (салат сорта «Старфайтер»). Показано, что результаты фотобиологических исследований создадут научный задел для организации производства на ОАО «Ардатовский светотехнический завод» фитооблучателей на основе светодиодов, спектральная плотность потока излучения которых максимально учитывает «предпочтения» салатно-зелёных культур.

Ключевые слова: светокультура; фитооблучатель со светодиодами; спектральный состав; облучённость; экспериментальная исследовательская гидропонная установка; фотобиологические исследования; биомасса.

The results of photobiological studies are introduced. The purpose of studies was to determine the preferred requirements for the spectrum of phyto-irradiators in an experimental research hydroponic installation for photoculture of plants based on LEDs with a combined radiation spectrum taking into account the specific features of specific crops and growing tasks. The influence of the spectral compositions of phyto-irradiators based on LEDs on the productivity (biomass) of green culture (salad of the Starfighter variety) is estimated. It is shown that the results of photobiological studies will create a scientific basis for organizing the production of phyto-irradiators based on LEDs at the Ardatov Lighting Engineering Plant OJSC, which spectral radiation flux density maximally takes into account the «preferences» of salad-green crops.

Keywords: light culture; phyto-irradiator with LEDs; spectral composition; irradiance; experimental research hydroponic installation; photobiological studies; biomass.

Целью принятой в Российской Федерации Концепции долгосрочного социально-экономического развития Агропромышленного комплекса до 2020 г. является обеспечение населения качественной сельскохозяйственной продукцией и продовольствием отечественного производства, в том числе овощной продукцией во внесезонный период. Достижение поставленной цели осуществляется через повышение конкурентоспособности российского овощеводства защищённого грунта [1]. Реализация указанной Концепции сопровождается активным строительством новых и реконструкцией существующих зимних тепличных комплексов. Несмотря на быстрое развитие светодиодных источников света, в теплицах и на фабриках растений в настоящее время традиционно используются облучатели с натриевыми лампами высокого давления (НЛВД) с фитоспектром. Переход же на светодиодное освещение позволит сократить до 50 % расход электроэнергии на светокультуру, затраты на которую составляют около 20 % от себестоимости. Достигнув и превзойдя уровень облучателей с фито-НЛВД по энергоэффективности, светодиодные фитооблучатели превосходят их также по возможности оптимизации спектральных характеристик излучения с учётом видовых особенностей конкретных культур и задач выращивания. Именно на основе светодиодов в настоящее время возможно создание фитооблучателей со спектром, необходимым для конкретной культуры [2—6].

Проведённые фотобиологические исследования [3] убедительно 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 связи с этим Мордовский гсударственный университет им. Н.П. Огарёва совместно с Ардатовским светотехническим заводом и кафедрой электроники МИРЭА — Российского технологического университета провели фотобиологические исследования, цель которых заключалась в определении предпочтительных требований к спектру фитооблучателей и уровням облучённости в экспериментальной установке для светокультуры растений на основе светодиодов комбинированного спектра с учётом видовых особенностей конкретных культур и задач выращивания. В качестве объекта исследований была выбрана группа зелёных овощных культур, в частности салат сорта «Старфайтер», являющийся перспективной культурой для хозяйственного выращивания в зимних тепличных комплексах.

Для проведения фотобиологических исследований Ардатовский светотехнический завод разработал серию фитооблучателей со светодиодами. Спектры излучения фитооблучателей представлены на рис. 1.

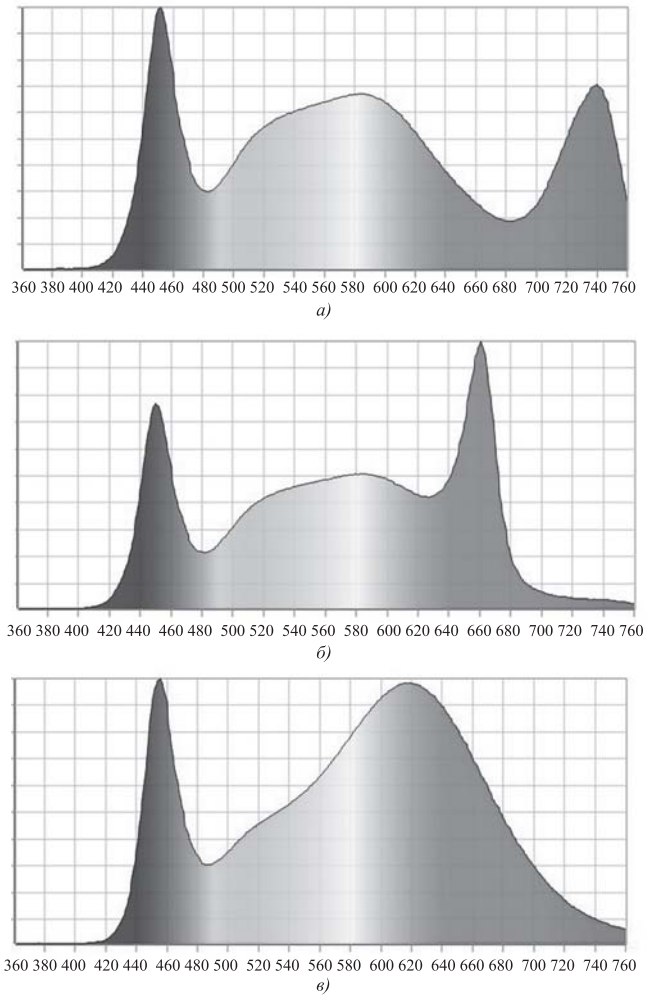


Рис. 1. Спектры излучения фитооблучателей:
а — ФО1; *б* — ФО2; *в* — ФО3

Конструкция фитооблучателей предусматривала монтаж четырёх светодиодных модулей. В зависимости от требуемого спектра на каждом модуле использовались соответствующие типы светодиодов для создания сплошного спектра и квазимонохроматических участков, например, в области 660 и 730 нм.

Каждый модуль фитооблучателя ФО1 включал светодиоды типа FM-P3528WNS-460W-R80 фирмы NationStar с цветовой температурой $T_ц$, равной 6500 K, и светодиоды Cherry Red группы FX1 с пиковой длиной волны λ = 730 нм фирмы Edison. Фитооблучатель ФО2 собран на основе модулей со светодиодами типа FM-P3528WNS-460W-R80 с $T_ц$ = 6500 K и светодиодами Deep Red группы EX0 с пиковой длиной волны λ = 660 нм фирмы Edison. Модуль фитооблучателя ФО3 включал светодиоды FM-CP3030WDS-460W-R80 с $T_ц$ = 4000 K и светодиоды типа L1SP-PRP1003500000 Purple (12,5 % Blue) фирмы Lumileds.

Для фотобиологических исследований при выращивании салата использовалась экспериментальная исследовательская гидропонная установка (ЭИГУ), которая состояла из трёх ярусов. Площадь рабочей зоны каждого яруса составляла 0,91 м^2. Над каждым ярусом были закреплены три фитооблучателя (рис. 2).

ЭИГУ была смонтирована в лаборатории искусственного климата Мордовского государственного университетта им. Н.П. Огарёва. Условия эксперимента соответствовали требованиям фитотронной технологии

Рис. 2. Экспериментальная исследовательская гидропонная установка

выращивания салата. Температура воздуха днём составляла 22 °С и ночью — 18 °С. Полив проводился через каждые 2 ч по 15 мин. Салат выращивался в горшках, наполненных субстратом IZOVOL AGRO Universal. Питательный раствор содержал следующие минеральные удобрения: KH_2PO_4, K_2SO_4, $MgSO_4$, $Ca(NO_3)_2$, KNO_3, Хелфтэм Fe 13 %. Поддерживаемая влажность воздуха составляла 70 %.

Для облучения верхнего яруса ЭИГУ использовались фитооблучатели ФО1, среднего — ФО2, нижнего — ФО3.

Фотобиологические исследования проводились в период с 11 декабря 2018 г. по 14 января 2019 г.

При проведении фотобиологических исследований использовалась методика выращивания салатно-зелёных растений по технологии светокультуры, разработанная агротехническим комплексом ГУП РМ «Тепличное».

11 декабря 2018 г. был осуществлён посев семян салата сорта «Старфайтер» без облучения. С 13 декабря по 23 декабря 2018 г. эксперименты проводились при фотопериоде в 24 ч (уровень облучённости 115...120 мкмоль/с·м^2). С 24 декабря 2018 г. фотопериод составлял 16 ч.

Результаты учёта биомассы салата приведены в таблице.

Салат на верхнем ярусе под фитооблучателями ФО1 имеет наименьшую массу и очень хрупкий стебель. Корневая система развита слабо. Салат на среднем ярусе под фитооблучателями ФО2 получился с объёмной листвой и плотным стеблем. Высота листьев в среднем составила 27 см. Корневая система развита средне. Салат на нижнем ярусе, облучаемый фитооблучателями ФО3, отличается от образцов на других ярусах самой объёмной листвой и плотным стеблем. Высота листьев в среднем составила 24 см. Корневая система развита лучше других образцов.

Содержание нитратов определялось в лаборатории ГУП РМ «Тепличное». Нитраты — это промежуточный продукт фотосинтеза, чем их меньше, тем больше глюкозы и витамина С в продукции, что влияет на её органолептические свойства. Результаты исследований показали, что для всех вариантов этот показатель ниже предельно допустимой концентрации (2000 мг/кг).

Оценка биомассы салата сорта «Старфайтер», г

Фито-облучатель	Дата			
	27.12.2018 г.	04.01.2019 г.	09.01.2019 г.	14.01.2019 г.
ФО1	61,5	94,5	103,5	120,5
ФО2	58	114	150,5	214
ФО3	83,5	132,5	161	219

Таким образом, наиболее «предпочтительным» для роста салата из трёх спектральных составов оказался спектр излучения фитооблучателя ФО3, полученный на основе 12 светодиодов типа FM-CP3030WDS-460W-R80, имеющих сплошной спектр и $T_ц$ = 4000 К, и 12 светодиодов типа L1SP-PRP1003500000 Purple (12,5 % Blue) с квазимонохроматическим спектром излучения.

Результаты фотобиологических исследований создают научный задел для организации производства на Ардатовском светотехническом заводе фитооблучателей на основе светодиодов, спектральная плотность потока излучения которых максимально учитывает «предпочтения» салатно-зелёных культур. Применение светодиодов со сплошным спектром излучения в сочетании со светодиодами, имеющими квазимонохроматический спектр излучения, позволит эффективно воздействовать на фотоморфогенетические процессы в растении и достичь эффективности более 3 мкмоль/Дж.

Библиографические ссылки

1. **Распоряжение** Правительства Российский Федерации от 17 ноября 2008 г. № 1662-р «О Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года». Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_82134/28c7f9e359e8af09d7244d8033c66928fa27e527/ (дата обращения: 07.06.2019).

2. **Прикупец Л.Б.** Технологическое освещение в агропромышленном комплексе России // Светотехника. 2017. № 6. С. 6—14.

3. **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-зеленных культур // Светотехника. 2018. № 5. С. 6—12.

4. **Куршев А.Е., Рузанкин С.И., Зориков Н.С.** Выращивание салата под светодиодными источниками света полного спектра // Теплицы России. 2018. № 2. С. 30—31.

5. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. 136 с.

6. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС, 2018. 135 с.

Ссылка для цитирования

Куршев А.Е., Богатырев С.Д., Железникова О.Е., Синицына Л.В., Микаева С.А. Высокоэффективные фитооблучатели на основе комбинированного спектра // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 12. С. 569—571.

УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ «АВТОМАТИЗАЦИЯ. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ» в 2019 г.

№ журнала Стр.

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А. Оценка показателей эффективности функционирования энергообъектов в мультиагентной микроэнергосистеме 10 449

Акулёнок М.В., Тихонов М.Р. Сравнительный анализ автоматизированных систем управления рисками. 9 387

Акулов П.А., Петрешин Д.И. Автоматизация контрольной операции проверки электрических соединителей 6 257

Амелькина С.А., Халиков М.М., Микаева С.А. Анализ программ компьютерного моделирования освещения 4 163

Ахмедов М.А., Гусейнзаде Ш.С., Насирова Е.А. Разработка алгоритма автоматизации преобразования конечного автомата в сеть Петри 3 108

Байнев В.В., Байнева И.И. 3D-моделирование и прототипирование в светотехническом производстве 2 51

Бигалиева А.З. Расчёт степени помола сырья с применением прикладного программного обеспечения ANETR5 на примере планетарной мельницы 2 77

Бойчук М.И., Микаева А.С., Микаева С.А. Температурно-частотные характеристики резонаторов 8 343

Буренин В.В. Современные способы и устройства для очистки сточных вод промышленных предприятий 12 550

Бутакова М.А., Мизюков Г.С., Чубейко С.В. Способ построения маршрута общественного транспорта в реальном времени на основании отношения подобия 5 206

Вернигоров Ю.М., Лебедев В.А., Фролова Н.Н., Лелетко К.К. Энергетические условия управления гранулометрическим составом продуктов измельчения высококоэрцитивных ферромагнетиков в магнитовибрирующем слое. 9 396

Григорьев-Фридман С.Н. Автоматический способ регулировки коэффициента стоячей волны по напряжению и неравномерности по АЧХ в СВЧ-аттенюаторах 1 14

Гусейнова М.В. Оптимизация измерения концентрации CO_2 в воздухе жилых и производственных помещений методом оптико-акустической спектрометрии. 10 435

Дранников А.В., Шевцов А.А., Квасов А.В., Бубнов А.Р. Формирование каналов управления процессом комбинированной сушки свекловичного жома 2 69

Дьяков И.Ф. Особенности использования интерфейса программы на металлорежущем станке MAZAK VARIAXIS 8 348

Евстропов В.А. Расчёт переходной функции ненагруженного элемента Пельтье для охлаждения маломощных телевизионных передатчиков 9 391

Железникова О.Е., Д. Мохаммед С. Джума, Михалькова А.Н., Микаева С.А. Освещение светодиодными источниками света 12 540

Загидуллин Р.Р. Влияние подналадки металлорежущего оборудования на точность планирования в системах классов APS, MES 12 535

Иванов В.К. К решению основной задачи управления автоматизированным мелкосерийным машиностроительным производством 3 104

Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А., Аносов М.С., Колчин П.В. Оптимизация управляющей программы для станков с ЧПУ с учётом динамической устойчивости процесса резания и оптимальных режимов обработки в условиях цифровых производств 1 3

Козлов В.Г., Скрыпников А.В., Чернышова Е.В., Микова Е.Ю., Ломакин Д.В. Автоматизированные уровни управления лесовозной автомобильно-дорожной системой. 1 27

Кондрашов С.Н., Шумихин А.Г., Берсенева Н.И. Разработка системы управления процессом многоступенчатой абсорбции формальдегида 3 99

Коноплёв В.И., Анцев В.Ю., Воробьёв А.В. Ленточный конвейер с устройством для разгрузки насыпных липких грузов 3 113

Копылов Ю.Р., Бирюков М.И. Цифровые технологии измерения износа клиновых пазов и деформаций крупногабаритных рам тележек подвижного железнодорожного состава с применением лазера. 12 531

Коростелёв В.Ф., Денисов М.С. Автоматизация управления процессами заготовительного производства. 4 152

Куликов И.Н., Колесник Л.Л. Повышение производительности эксплуатируемого многокластерного технологического комплекса с использованием имитационного моделирования потоков полуфабрикатов 6 269

Лобусов Е.С., Юнесс С. Алгоритм оценки степени демпфирования колёсной машины 5 199

Малышева А.В., Затонский А.В. Исследование перспектив перехода на автоматическое управление процессом флотации калийной руды 3 119

Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И., Дюкин А.А. Индустриальный комплекс для очистки воздуха. 10 437

Микаева С.А., Микаева А.С., Петренко Ю.П. Ультрафиолетовая СВЧ-лампа 7 304

Мончарж Э.М., Наумова Е.Г. Комбинированное управление качеством стиролакриловой дисперсии. 4 147

Мончарж Э.М., Рябкова Т.А. Управление температурным режимом при завершении химической реакции периодического процесса 3 115

Мостовой В.Д., Бирюков В.П. Реализация фильтра высокой частоты для развязки контуров управления силой резания по обратной связи 12 544

Ничков А.В., Ничков А.Г. Сравнение двух методик определения зависимости износа зубьев червячных фрез от размеров срезаемых ими слоёв 4 158

Нурматов Н.З. Оптимизация процесса горения в промышленных котлах на основе нечёткой логики. 9 401

Резчиков А.Ф., Кушников В.А., Иващенко В.А., Фоминых Д.С., Богомолов А.С., Филимонюк Л.Ю. Снижение ущерба от критических сочетаний событий при сварке роботизированными технологическими комплексами 1 22

Саханский С.П., Юленков С.Е. Анализ точности контактного метода измерения площади кристаллов, выращиваемых способом Чохральского. 2 62

Семенов А.Д., Авдеева О.В. Анализ топологии поверхности алмазного шлифовального круга с использованием сингулярного разложения 1 8

Солдатов Е.С., Архаров И.А. Анализ термодинамической эффективности установок реконденсации паров сжиженного природного газа. 7 300

Старостин Н.П., Васильева М.А., Аммосова О.А. Управление нагревом и охлаждением при сварке полиэтиленовых труб в раструб в условиях низких температур 10 443

Сульдин С.П., Митин Э.В., Калякулин С.Ю. Расчёт на прочность загруженного штабельным грузом легкового прицепа общего назначения, работающего в режимах трогания с места и поворота 4 169

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Верченко А.В. Оптимизация процесса гидроабразивной резки листового проката 6 263

Тимофеев Б.П., Данг Н.Т. Автоматизация процесса сборки зубчатых передач 11 483

Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-УСТ: анализ усталостной прочности конструкций печатных плат и электрорадиоизделий при механических воздействиях. 5 195

Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-М-3D: моделирование произвольных конструкций электроники на механические и тепловые воздействия 7 291

Шалумов А.С., Соловьев Д.Б., Шалумов М.А. АСОНИКА-ИД: идентификация параметров моделей механических процессов конструкций электроники 8 339

Шалумов А.С., Шалумов М.А. АСОНИКА-Р: автоматизированное заполнение карт рабочих режимов электрорадиоизделий 6 243

Шамаев А.Е., Сердобинцев С.П., Шамаев Е.П. Алгоритм адаптивного управления энергоэффективной системой охлаждения магистрального газа 2 55

Швырков И.Н., Юдин А.В. Модель влияния конвективного теплообмена на регулирование мощности в установках выращивания лейкосапфира 2 73

Щербатов И.А. Выбор способа достижения глобальной цели в системах управления ремонтом энергетических предприятий 6 252

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Байнева И.И. Инновационные технологии в системах управления освещением. 9 417

Балахонов К.А., Дябиров Р.М., Шахтарин Б.И. Исследование эффективности методов обнаружения OFDM-сигнала в подводном акустическом канале. 4 184

Бильфельд Н.В., Володина Ю.И. Формирование кривой разгона объекта управления по импульсной динамической характеристике 11 505

Булдакова Т.И., Суятинов С.И. Разработка адекватных моделей в технологии цифровых двойников. 8 367

Васильков Ю.В., Камакин А.Н., Сергеев И.А., Фролов П.А. Анализ методов выделения тренда 11 499

Волотов Е.М., Нестеров С.В., Евдокиенко А.Д., Ломоносов В.Н., Кокорина С.Б., Волотова Т.А. Метод интерполирования функций при подготовке алгоритмов и программ обработки материалов лётных экспериментов 12 564

Григорьев-Фридман С.Н. Датчик панорамного обнаружения цели и уничтожения противника по модулированному лазерному лучу наведения в 3D-пространстве «Ладога-1М» 11 488

Гусейнова М.В., Шарифова Б.А. Вопросы оптимизации вентилирования производственных помещений 9 411

Елисеев В.А. Доминанты прогнозирования научно-технологического развития. 10 461

Елисеев В.А., Сажин В.А. Методологические аспекты управления форсайт-исследованиями инновационного развития 3 128

Елисеев В.А., Сажин В.А. Экспертиза в форсайт-исследованиях инновационного развития. 9 421

Железникова О.Е., Прытков С.В., Микаева С.А., Микаева А.С. К вопросу о преобразовании систем фотометрирования 9 406

Игамбердиев Х.З., Севинов Ж.У. Регуляризованные алгоритмы формирования управляющих воздействий в локально-оптимальных адаптивных системах управления динамическими объектами . .4 189

Исаева О.С. Системный подход к автоматизации испытаний бортовой аппаратуры космического аппарата 5 229

Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Аносов М.С. Применение цифровых двойников в аддитивных технологиях 9 414

Кирин Ю.П., Тихонов В.А. Идентификация ситуаций функционирования неопределённых динамических объектов в системах двухпозиционного регулирования 6 277

Клячкин В.Н., Кувайскова Ю.Е., Жуков Д.А. Влияние способа отбора значимых показателей на качество диагностики состояния технического объекта 1 32

Кожанова Е.Р. Программное обеспечение для настройки магнитных фокусирующих систем ламп бегущей волны О-типа 8 374

Куликов И.Н., Колесник Л.Л. Влияние параметров робота-манипулятора многокластерного технологического комплекса на общую производительность установки с использованием имитационного моделирования 4 180

Куршев А.Е., Богатырев С.Д., Железникова О.Е., Синицына Л.В., Микаева С.А. Высокоэффективные фитооблучатели на основе комбинированного спектра 12 569

Макаренков А.М., Тин Эй Чжо, Аунг Чжо Со. Оптимизация параметров ПИД-регулятора с учётом случайности параметров объекта управления 2 80

Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А. Бактерицидный рециркулятор 11 518

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Иваненко С.В., Губенко С.В., Шапкин В.С., Демин С.С. Влияние отличия от нормального распределения радиопомех на выбор алгоритма обработки информации и помехоустойчивость средств связи и дифференциальной подсистемы спутниковых радионавигационных систем 8 356

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Рябченко В.Н., Филимонов А.В. Аналитическое представление собственных векторов числовой матрицы 3 134

Мирзаханов В.Э. Синтез графической системы распознавания участков человеческой кожи посредством лингвистического реферирования 1 37

Назаренко М.А. Организация менеджмента качества мобильных операционных систем 11 514

Никифоров С.О., Хозонхонова Д.Д., Никифоров Б.С. Классификационные признаки аддитивных технологий и средств быстрого прототипирования 8 377

Николаев С.В. Моделирование вероятности обнаружения наземных объектов 4 172

Пашкова Е.Э., Кабулова Е.Г. Профили мультиагентной системы управления международными конфликтами 7 313

Пролетарская В.А. Каскадное использование фильтра Блума при реализации SQL-запроса с коррелированным подзапросом на платформе параллельной обработки данных Spark 2 . . . . . .3 138

Расколова М.О. Нелинейное управление в задаче подавления роста опухоли 5 211

Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Управление движением шагающего робота с упругими звеньями посредством оптимизации траектории 6 272

Скворцов О.Б. Ограничение точности при измерении пространственных величин с ортонормализацией 5 217

Терентьев В.Б. Определение вероятности своевременного вылета летательного аппарата 8 362

Тимофеева М.С., Глазунов Д.В., Семенов В.Н., Мизюков Г.С. Автоматизация подготовки специалистов в Ростовском государственном университете путей сообщения с поэтапным контролем её уровня 5 223

Фанг Ф.С., Хыонг Ч.Н., Чыонг Ф.С. Алгоритмы коррекции навигационных систем летательных аппаратов. 10 467

Хо Ц. К вопросу о построении программной траектории робота по данным от сопровождающего дрона 5 235

Ху Ц., Лукьянова Н.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Разработка компактных алгоритмов параметрической идентификации для беспилотных летательных аппаратов. 10 473

Хусаинова Г.Я., Хусаинов И.Г. Моделирование колебательного движения аномальной жидкости в неоднородной пористой среде 2 87

Ху Ц., Чжан Л., Мин Я., Ли Ю., Шэнь К. Оценивание состояния неопределённых систем. . . .12 558

Чернышев А.Б., Назарцев М.С., Майрансаев З.Р. Анализ автоколебаний систем с распределёнными параметрами. 11 510

Шэнь К., Лифэй Ч., Селезнева М.С., Неусыпин К.А. Модификация федеративного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов авианосного базирования. 4 177

Ямашкин С.А., Ладанова Е.О. Моделирование географически распределённой телекоммуникационной сети 7 307

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Давиденко А.Н., Давиденко П.Н., Лапшин Н.А. Методика расчёта модуля автомобильных весов 2 92

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Иваненко С.В., Губенко С.В., Шапкин В.С., Далецкий С.В. Влияние аппаратурных ограничений на точность местоопределения воздушных судов с использованием спутниковых радионавигационных систем при переходе от кодовых к фазовым навигационным определениям 7 317

Саргсян Г.А., Сотникова С.Ю., Субботин С.А., Белый А.В. Метод обеспечения тепловых режимов работы оптоэлектронных приборов 7 330

Фам Суан Чыонг. Проектирование системы управления и навигационного комплекса беспилотных летательных аппаратов 7 323

Ху Ц., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Моделирование алгоритмов оценивания погрешностей инерциальных навигационных систем по данным лабораторного эксперимента 11 524

Шибанов Г.П. Диагностика неисправностей приборного оборудования 6 282

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Кондрашов Ю.Н. Хранилище данных для анализа бюджетного процесса 1 42

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 2, 3, 6, 9, 10

Указатель статей, опубликованных в журнале «Автоматизация. Современные технологии» в 2019 г. 12 572

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 26.09.2019.	Отпечатано в ООО «Канцлер»
Подписано в печать 20.11.2019.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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