Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 73

2 / 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
Ван Мэйлин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Иванов А.П. – д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Кларк Р. – д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)
Криони Н.К. – д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Кузнецов А.Е. – д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)
Мальцева С.В. – д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. – д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. – д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. – д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Пролетарский А.В. – д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Путилов В.Н. – ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель главного редактора)
Румянцева О.Н. – генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»
Ся Юаньцин – д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)
Фу Ли – д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)
Фёдоров И.Б. – д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн – д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. – д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. – д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. – д.э.н., проф., Кошалинский политехн. ин-т (Польша)

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

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

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

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

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

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

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

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

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

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

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

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

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 96

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

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 73 2/2019

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

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

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

Founder:

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

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

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Baynev V.V., Bayneva I.I. 3D modeling and prototyping in lighting engineering production 51
Shamaev A.E., Serdobintsev S.P., Shamaev E.P. Algorithm for adaptive control of energy-efficient cooling system for gas main . . 55
Sakhanskiy S.P., Yulenkov S.E. The accuracy analysis of the contact measuring method of the crystals area grown by the Chokhralski method 62
Drannikov A.V., Shevtsov A.A., Kvasov A.V., Bubnov A.R. Formation of channels for managing the process of combined drying of beet pressed skins 69
Shvyrkov I.N., Yudin A.V. Model of the influence of convective heat transfer on power regulation in installations for leucosapphire growing 73
Bigalieva A.Z. Calculation of the grinding degree of raw materials through the use of software ANETR5 as an example of planetary mill 77

MODERN TECHNOLOGIES

Makarenkov A.M., Tin Aye Kyaw, Aung Kyaw Soe. Optimization of the PID controller parameters taking into account the randomness of the parameters of the control object 80
Khusainova G.Ya., Khusainov I.G. Modelling of the oscillatory motion of an anomalous fluid in an inhomogeneous porous medium 87

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Davidenko A.N., Davidenko P.N., Lapshin N.A. Method of calculating the weighing machine for heavy-duty vehicles 92

REVIEW OF PERIODICAL PRESS

On the journals pages 96

© Publishing «Innovative machine building», «Automation. Modern technologies», 2019

УДК 681.5

В.В. Байнев, И.И. Байнева, канд. техн. наук, доц.
(Институт электроники и светотехники, Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва)

baynevaii@rambler.ru

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОТОТИПИРОВАНИЕ В СВЕТОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Рассмотрены проблемы внедрения компьютерных цифровых технологий в производственную среду современной России. Показано, что эффективность работы проектировщиков и дизайнеров напрямую связана с внедрением моделирования и прототипирования изделий различной степени сложности. Проанализированы технологии для 3D-проектирования и прототипирования. Рассмотрены роль и возможности аддитивных технологий в современном светотехническом производстве. Описаны принципы компьютерного моделирования светильников на примере проектирования светодиодного модуля. Осуществлено экспериментальное исследование прототипа.

Ключевые слова: светильник; светодиод; прототипирование; моделирование; проектирование; программное обеспечение; оптическая система.

The problems of introducing computer digital technologies into the production environment of modern Russia are considered. It's shown that the effectiveness of the planners and designers work is directly related to the introduction of modeling and prototyping products with varying degrees of complexity. Technologies for 3D design and prototyping are analysed. The role and possibilities of additive technologies in modern lighting engineering production are considered. The principles of the illuminating attachment computer modeling are described as an example of designing a LED module. An experimental study of the prototype is realized.

Keywords: lamp; light-emitting diode; prototyping; modeling; designing; software; optical system.

Введение. Успешное развитие экономики России напрямую зависит от внедрения цифровых технологий во все сферы жизни [1]. В основе такого внедрения лежит ликвидация зависимости отечественной промышленности от зарубежных информационных технологий за счёт создания, развития и широкого внедрения отечественных разработок в этой области [2].

3D-технологии (процесс создания цельных трёхмерных объектов практически любой геометрической формы на основе цифровой модели) и аддитивные технологии (технологии по созданию объектов последовательным нанесением слоёв материала) входят в число определяющих технологий перехода к цифровой экономике на современном этапе.

Производственные и компьютерные технологии 3D-проектирования и прототипирования. Одна из сфер перспективного применения цифровых технологий — 3D-моделирование и проектирование. С их помощью дизайнеры и проектировщики могут повышать эффективность своей работы, дизайнеры из разных стран могут одновременно работать с одним объектом в режиме реального времени, что позволяет решать проблемы с коммуникацией. С помощью цифровых методов моделирования «выращивают» прототипы и создают различные реальные объекты: от мелких ювелирных изделий до крупных инфраструктурных сооружений. Ярким практическим примером является создание 3D-принтеров по строительству мостов (Нидерланды) и жилых домов (Китай, ОАЭ). Такой подход позволяет управлять полным жизненным циклом практически любого изделия от идеи создания, производства и использования до утилизации. Это касается не только отдельных бытовых предметов, но и сложных систем. На предприятиях достигают быстрых инноваций, используя такие технологии, как 3D-печать и прикладные программы.

Потребность в получении на основе трёхмерной компьютерной модели реального физического объекта существует практически в любой сфере деятельности человека. 3D-принтеры позволяют сэкономить массу времени и сил инженерам, дизайнерам и изобретателям и считаются одним из величайших изобретений XXI в.

3D-печать основана на концепции построения объекта последовательно наносимыми слоями материала, соответствующими контуру его модели. Фактически 3D-печать является полной противоположностью такого традиционного метода механического производства и обработки, как резание, при котором формирование облика изделия происходит за счёт удаления лишнего материала (так называемое «субтрактивное производство»). 3D-принтер — это устройство, позволяющее на основе компьютерной 3D-модели печатать реальные физические объекты, используя специальные материалы. Материалы для печати могут быть различными и во многом зависят от технологии печати.

Основных технологий 3D-печати две:

лазерная, когда в качестве материала выступает специальный жидкий фотополимер, затвердевающий под действием лазерного излучения, либо порошковый материал (пластик, металл), подвергающийся плавлению под действием лазерного излучения; печать объекта производится постепенно, слой за слоем;

струйная, когда в качестве материала используется плавкий рабочий материал (пластик, металл, воск), подаваемый в экструзионную головку, которая в свою очередь выдавливает на поверхность основы создаваемого объекта его тонкий слой; после застывания этого слоя наносится следующий.

Основное применение в промышленности 3D-принтеров — быстрое прототипирование деталей механизмов или целых изделий. Прототип можно посмотреть, визуально оценить и подержать в руках. Благодаря быстрому созданию прототипов компании по всему миру снижают стоимость и сроки разработки сложных продуктов. На распечатанной модели удобно проводить различные эксперименты и тесты перед тем, как запустить изделие в серийное производство. Но самое главное — это скорость производства прототипа, достаточно просто отправить модель на печать и через некоторое время получается готовый объект. Уже существует целая индустрия быстрого прототипирования (Rapid Prototyping — RP).

Возможность быстрого и лёгкого создания физических прототипов трёхмерных моделей новых изделий позволяет значительно ускорить процесс их разработки. Полученные изделия-прототипы имеют те же самые геометрические размеры и форму, что и реальные изделия. При создании прототипа необходимо решать задачи точного повторения внешнего вида изделия, его геометрической формы, использовать материалы с нужными свойствами.

Используя программное обеспечение для моделирования, можно точно рассчитать характеристики воздушных и тепловых потоков и многое другое. В настоящее время в качестве исходных трёхмерных моделей для 3D-печати в основном используются модели формата STL или OBJ.

Построение прототипа обычно происходит на основе твёрдотельной модели из какой-либо CAD-системы. Одним из распространённых форматов для представления модели прототипа является формат STL, который используется для 3D-моделирования и в 3D-принтерах. Модели в таком формате умеет сохранять практически любая 3D-программа (3ds Max, Autocad, Blender, Rhino и др.). STL-файл содержит поверхностное представление 3D-модели, без подробных спецификаций таких аспектов, как цвета, оптические и физические свойства материалов.

Аддитивные технологии в светотехническом производстве. Постоянно развивающийся светотехнический рынок ставит всё более жёсткие условия по срокам разработки и постановки на производство новых видов продукции. Сложность конструкции современных световых приборов (СП) приводит к увеличению рисков и значительному росту цены конструкторской ошибки [3]. СП для различных систем освещения должны удовлетворять требованиям по качеству и надёжности. Выход отечественных предприятий на мировой рынок требует совершенствования бизнес-процессов и технологий, в частности тех, которые применяются для снижения временны́х затрат на создание новой продукции. Один из современных и прогрессивных приёмов для этого — использование аддитивных технологий (3D-печати). Они позволяют за считанные часы получить конечное изделие и провести оценку его конструктивных и технологических параметров. Кроме того, у технологии 3D-печати есть ещё одно неоспоримое преимущество для индустрии освещения — индивидуализация.

Первый опыт прототипирования и функциональных испытаний деталей изделий имел место ещё в 2007 г. При помощи 3D-принтера изготавливали корпусные детали прожектора Prolight. Более масштабно технологии 3D-печати начали использовать в 2014 г. — для изготовления рабочих прототипов светильников для уличного и внутреннего освещения. Прототипы изготавливали как целиком из выращенных пластиковых деталей, так и в комбинации выращенных пластиковых деталей и алюминиевых деталей, изготовленных по традиционной технологии (так называемый гибридный подход в производстве).

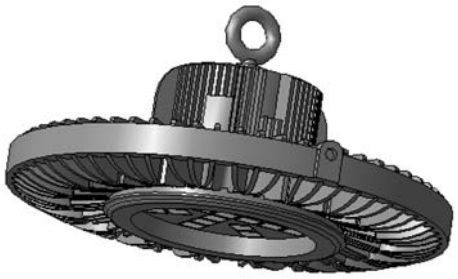


Рис. 1. 3D-модель светодиодного светильника

Рис. 2. Дизайнерские светильники, выполненные по технологии 3D-печати

Сегодня простые или наиболее ответственные элементы светильников, испытывающие высокие эксплуатационные нагрузки, изготавливают пока ещё старыми методами — на оборудовании с ЧПУ и с помощью ручной металлообработки. Сложные детали и дизайнерские изделия для выставок и натурных испытаний производят из FDM-термопластиков. Конечно, приходится тратить время на операции постобработки и покраски, но высокая скорость получения результата и гибкость нового технологического процесса очевидны. Полученные прототипы в виде комбинации алюминиевых и пластиковых деталей будущих серийных изделий позволяют провести ряд испытаний, в том числе тепловых.

Благодаря технологии 3D-печати дизайнеры и инженеры могут отказаться от привычных моделей и начать выпускать СП под определённое помещение или проект. Аддитивное производство помогает находить новые методы производства СП, новые методы их использования в нашей повседневной жизни. А с помощью специальной оптики можно улучшить распределение света, его рассеяние, яркость и другие свойства.

На рис. 1 приведена 3D-модель для прототипирования и печати корпуса светодиодного светильника, на рис. 2 — дизайнерские светильники, выполненные по технологии 3D-печати.

Компьютерное моделирование светодиодного модуля. Энергоэффективные светодиодные СП — перспективное направление развития современной светотехники [4—6]. Для освещения дорог был разработан светодиодный (СД) модуль для уличного светильника. Необходимое светораспределение в структуре модуля может обеспечиваться стандартными или индивидуально спроектированными специализированными оптическими системами (рис. 3) [7—10].

Применение полностью прозрачных материалов, изготовленных при помощи аддитивных технологий, позволит создавать прототипы вторичной оптики и имитировать облик будущих изделий. Наиболее прочные и термостойкие материалы могут послужить основой для быстрого изготовления образцов для полнофункциональных натурных испытаний. Создание прототипа позволяет без существенных финансовых вложений убедиться в работоспособности полученного оптического решения.

Была разработана 3D-модель светодиодного модуля для светильника уличного освещения, экспортирована в программу 3DS Max в формате STL для 3D-принтера (рис. 4).

Рис. 3. Специализированные светодиодные оптические системы

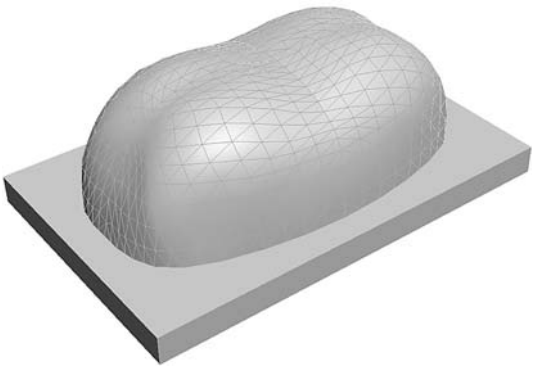


Рис. 4. Модель СД-модуля

3D-прототипирование оптической системы светодиодного модуля. На базе 3D-модели светодиодного модуля было осуществлено его 3D-прототипирование. Для этого использовали установку быстрого прототипирования ULTRA 3SP, которая сочетает в себе точность и многофункциональность аппаратов для быстрого создания прототипов из различных материалов [11].

Модель, полученная с помощью 3D-печати, полностью готова для изготовления силиконовой формы с последующей заливкой в неё полиуретана. Мастер-модель линзы подвергли ручной доводке для удовлетворения специальных требований по шероховатости и точности. Образцы СД-модулей были изготовлены на базе СД Cree XLamp XM-L2 (рис. 5).

Установка ULTRA 3SP основана на технологии SLA (Stereo Lithography Apparatus — стереолитография), т. е. на послойном отверждении жидкого фоточувствительного полимера под действием ультрафиолетового лазерного излучения, направляемого сканирующей системой. Она даёт возможность применять различные материалы для трёхмерной печати, в том числе прозрачные и термостойкие, и обеспечивает высокий уровень разрешения печати, что позволяет получать гладкие поверхности, мелкие движущиеся детали и тонкие стенки. Ключевой особенностью этого 3D-принтера является возможность использовать прозрачный материал E-Glass. Он наиболее пригоден для создания мастер-моделей для малых серий изделий из пластика и быстрого прототипирования, позволяет прототипировать различные прозрачные светотехнические детали (защитные стёкла сложной формы, линзы, оптические элементы и пр.).

Измерение характеристик экспериментального светодиодного модуля. На основе технологии 3D-прототипирования изготовлены экспериментальные образцы светодиодных модулей и исследованы их светотехнические и тепловые характеристики.

Результатом экспериментального исследования СД-модуля на гониофотометре стали фотометрическое тело (рис. 6) и кривая силы света (КСС — основная светотехническая характеристика любой осветительной системы [11]) (рис. 7), которые отвечают требованиям дорожного освещения. Максимальная сила света для данного образца составила 168 Кд, световой поток — 226 лм, угол излучения — 120°.

Для определения распределения температуры по поверхности разра-

Рис. 5. СД CreeXLamp XM-L2

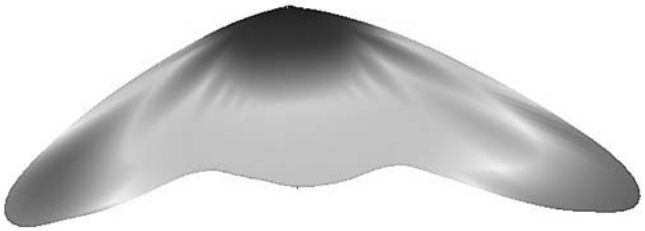


Рис. 6. Фотометрическое тело СД-модуля

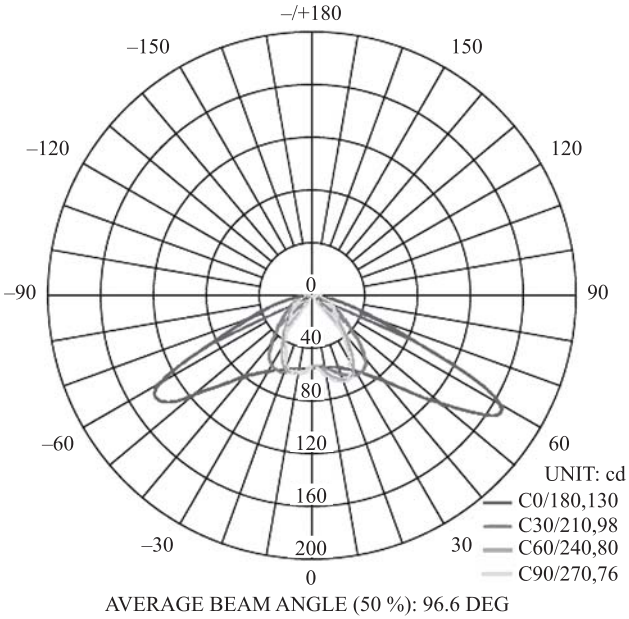
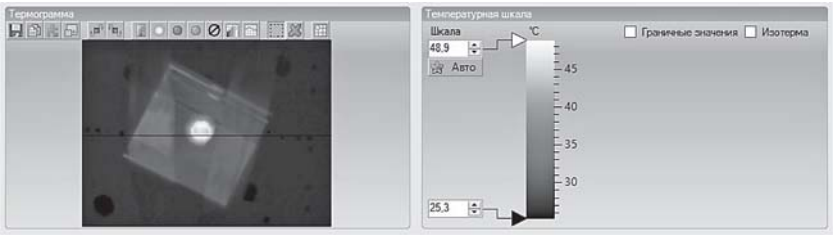


Рис. 7. КСС экспериментального СД-модуля



а) *б)*

Рис. 8. Термограмма экспериментального СД-модуля:
а — снимок тепловизором экспериментального модуля; *б* — температурный градиент по поверхности СД-модуля

ботанной линзы была измерена температура с помощью тепловизора Testo 881 (рис. 8). Максимальная температура на поверхности линзы составляет 48,9 °С, что не превышает значения этого параметра для подобных систем.

Выводы. В современной светотехнике расчёт и моделирование светотехнических характеристик светодиодных модулей и СП является актуальной задачей.

Осуществлено компьютерное моделирование светодиода, его оптической системы в виде линзы свободной формы и светодиодного модуля в сборе. Получены 3D-модели СД-модуля, его фотометрическое тело и кривые силы света в двух плоскостях. На основе технологии 3D-прототипирования изготовлены экспериментальные образцы светодиодных модулей и исследованы их светотехнические и тепловые характеристики.

Библиографические ссылки

1. **ТАСС.** Информационное агентство России [Электронный ресурс]. URL: http://tass.ru (дата обращения 24.01.2018).

2. **Программа** «Цифровая экономика Российской Федерации». Утв. Распоряжением Правительства РФ от 28.07.2017 г. № 1632-р.

3. **Умное** производство [Электронный ресурс]. — URL: http://www.umpro.ru (дата обращения 24.01.2018).

4. **Байнева И.И.** Современные энергоэкономичные технологии освещения // Научные исследования и разработки. Экономика фирмы. 2017. Т. 6. № 2. С. 19—24.

5. **Bayneva I.I.** Concerns Of Design Of The Energy-Efficient Fixtures // Intern. J. of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. No. 3. P. 6479—6487.

6. **Bayneva I.I.** Features of optical modeling in educational and scientific activity // J. Fundam. Appl. Sci. 2017. 9 (1S). P. 41—48.

7. **Байнева И.И.** Информационные технологии в моделировании оптических систем осветительных приборов // Информатизация образования и науки. 2017. № 2 (34). С. 15—23.

8. **Федосин С.А., Байнев В.В.** Разработка геометрических моделей для автоматизации процесса компьютерного проектирования осветительных приборов // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 3. С. 102—105.

9. **Байнева И.И., Байнев В.В.** Оптические системы для светодиодов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № 1 (238). С. 54—64.

10. **Байнев В.В.** Расчет и проектирование осветительных систем на основе светодиодов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № 11 (248). С. 27—31.

11. **Байнева И.И., Байнев В.В.** Исследование характеристик отражательной оптической системы // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № 6 (243). С. 51—56.

Ссылка для цитирования

Байнев В.В., Байнева И.И. 3D-моделирование и прототипирование в светотехническом производстве // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 2. С. 51—55.

УДК 621.643

А.Е. Шамаев, С.П. Сердобинцев, д-р техн. наук., проф., **Е.П. Шамаев,** доц.
(Калининградский государственный технический университет)

shamaev1992@gmail.com

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗА

Разработан алгоритм управления принципиально новой энергоэффективной системой охлаждения магистрального газа, результатом реализации которого является оптимизированный режим работы приводов электродвигателей вентиляторов, позволяющий добиться минимальных затрат электроэнергии при необходимых значениях контролируемой величины — конечной температуры охлаждаемого газа.

Ключевые слова: транспортировка природного газа; охлаждение; управление; алгоритм; адаптивность; экономия; энергоэффективность.

An algorithm for management a fundamentally new energy-efficient gas main cooling system is developed. The implementation of this algorithm ensures an optimized operating mode of the fans electric drives, which makes it possible to achieve minimum energy consumption with the necessary values of the controlled value — the final temperature of the cooled gas.

Keywords: transportation of natural gas; cooling; management; algorithm; adaptability; economy; energy efficiency.

Для транспортировки природного газа на большие расстояния по магистрали применяются компрессорные станции, создающие давление, обеспечивающее движение газа

в магистральной трубе. Используемые для охлаждения компримированного газа аппараты воздушного охлаждения (АВО) газа обеспечивают увеличение теплообмена между охлаждаемым газом и окружающей средой путём увеличения скорости охлаждающего теплоносителя (воздуха), а также увеличения поверхности теплосъёма за счёт оребрения труб с газом [1]. Отношение теплосъёма к мощности, затраченной на преодоление газом сопротивления оребрённых труб, с ростом скорости охлаждающего воздуха падает, и увеличение теплосъёма за счёт увеличения скорости воздуха становится энергетически нерациональным. На компрессорных станциях с газотурбинным приводом на долю АВО приходится до 70 % электроэнергии, потребляемой на транспортировку газа. В связи с этим задача повышения энергоэффективности устройств охлаждения магистрального газа является весьма актуальной. Для решения задачи интенсификации теплосъёма была разработана полезная модель энергоэффективной системы охлаждения магистрального газа (ЭСОГ), конструкция которой позволяет получить значения отведённой теплоты, как УАВО, при меньших затратах электроэнергии на создание потока охлаждающего воздуха за счёт снижения гидравлического сопротивления теплообменника охлаждающему воздуху.

Большое значение гидравлического сопротивления в АВО и, следовательно, значительная мощность вентиляторов обусловлены прохождением воздуха через многочисленные узкие зазоры оребрения пучка газовых труб. Снижение гидравлического сопротивления было получено путём уменьшения поверхности теплообмена, компенсируемого использованием промежуточного теплоносителя с бóльшим коэффициентом теплопроводности, чем у воздуха [2]. В конструкции ЭСОГ охлаждающий воздух проходит по многочисленным вертикальным гладкостенным трубам, сопротивление которых на порядок меньше (рис. 1). Передача теплоты от газа воздуху в данном случае осуществляется через промежуточный жидкий теплоноситель.

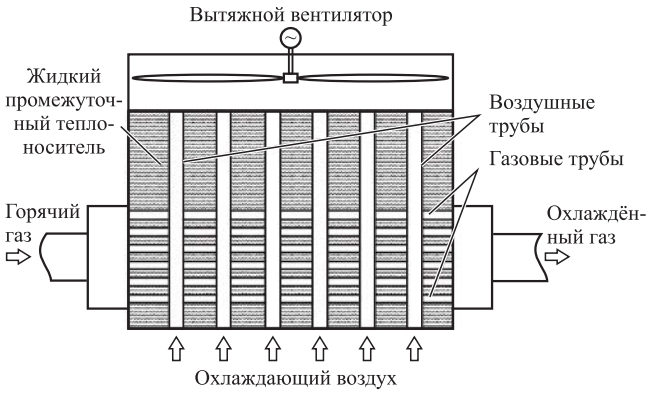


Рис. 1. Упрощённая схема модуля ЭСОГ

Пучок газовых труб расположен горизонтально, а воздушные трубы — вертикально. Газовый и воздушный теплообменники располагаются в корпусе, заполненном промежуточным жидким теплоносителем. Горячий газ проходит через пучок газовых труб, отдавая теплоту промежуточному теплоносителю, который затем отдаёт теплоту воздушным трубам, охлаждаемым воздухом. Поток воздуха через теплообменник обеспечивается вентилятором, установленным в верхней части кожуха.

Для дальнейшей оптимизации затрат электроэнергии на создание потока охлаждающего воздуха была поставлена задача по разработке алгоритма адаптивного управления ЭСОГ, состоящей из шести модулей (заменяет один АВО). Он выбирает режим работы приводов электродвигателей вентиляторов ЭСОГ, позволяющий добиться минимальных затрат электроэнергии при необходимой температуре газа, выходящего из ЭСОГ, работающего в штатном режиме.

На рис. 2 изображена структура адаптивного управления ЭСОГ, включающая в себя сбор данных, алгоритмы поиска оптимальных настроек, банки данных, содержащие готовые решения по числам оборотов вентиляторов для известных входных данных. Общий алгоритм работы системы адаптивного управления ЭСОГ приведён на рис. 3.

В блоке А0 происходит ввод начальных условий: входной температуры газа $T_{г.вх}$, расхода газа $G_г$ и температуры окружающей среды $T_{окр}$. Блок Р1 проверяет, имеется ли этот набор начальных условий в банках данных. В случае отсутствия таковых в блоке Р2 проверяется допустимость использования алгоритма оптимальной настройки ЭСОГ во время функционирования (оно может быть запрещено или разрешено оператором). Если использование алгоритма разрешено, то он выполняется в блоке А1, в блоке А2 оптимальные настройки записываются в банк данных 1, в блоке А3 задаётся оптимальное число оборотов вращения вентиляторов.

Если же выполнение алгоритма оптимальной настройки во время функционирования запрещено оператором, то в блоке А4 выполняется алгоритм поиска минимального энергопотребления ЭСОГ (аналитически-расчётный алгоритм) с последующей выдачей задания вентиляторам в блоке А5.

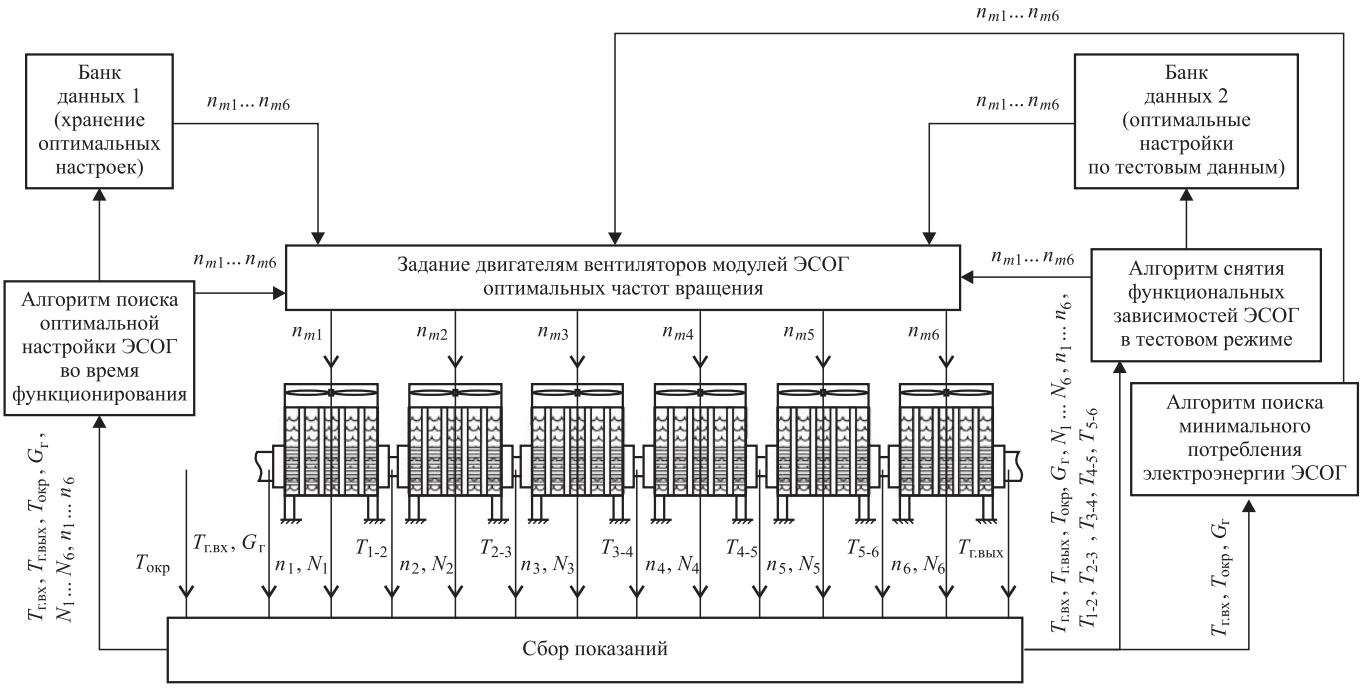


Рис. 2. Структура адаптивного управления ЭСОГ:
n_{mi} — оптимальное число оборотов i-го двигателя; $T_{г.вх}$, $T_{г.вых}$ — температуры газа на входе и выходе; $G_г$ — расход газа; N_i — мощность, потребляемая вентилятором

Если в результате выполнения алгоритма в блоке P1 выяснилось, что начальные условия соответствуют таковым в банках данных, то в блоке P2 проверяется, данным из какого банка (из банка тестовых данных или из банка данных, полученных в результате выполнения блока A1). В блоках A6 и A7 задаются оптимальные числа оборотов вентиляторов.

Таким образом, структура адаптивного управления установкой включает в себя три алгоритма: первый позволяет найти минимальное потребление электроэнергии, используя данные, полученные в результате расчёта математической модели ЭСОГ, а второй позволяет оптимально настроить реальную установку во время её функционирования. Третий алгоритм показывает процедуру получения зависимости отводимой теплоты и затрачиваемой мощности от числа оборотов двигателя для каждого вентилятора в тестовом режиме работы. Такой режим возможен перед вводом ЭСОГ в эксплуатацию или при кратковременном переводе ЭСОГ в тестовый режим для определения его реального состояния.

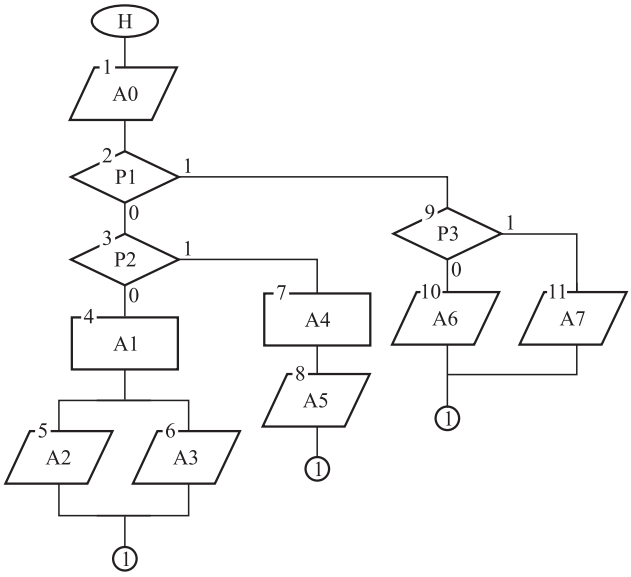


Рис. 3. Алгоритм адаптивного управления ЭСОГ

Приведённые алгоритмы управления в целях минимизации энергозатрат предлагается классифицировать по принципу поиска конечного результата следующим образом:

1) алгоритм поиска режима потребления минимальной электроэнергии (АПРП), использующий адекватную математическую модель ЭСОГ, связывающую потребление электроэнергии N_Σ с заданным теплоотводом Q_Σ, — аналитически-расчётный алгоритм. Вместо математической модели допустимо использование графических характеристик вентиляторов, поставляемых производителем;

2) АПРП с использованием метода малых управляющих воздействий во время штатного функционирования;

3) АПРП с использованием реальных зависимостей N_Σ от Q_Σ, снятых в тестовом режиме

на действующих установках, — опытно-аналитический алгоритм.

С точки зрения минимального вмешательства в работу установки на компрессорной станции первый и третий алгоритмы имеют несомненные преимущества. Однако построение достаточно адекватной математической модели ЭСОГ, включающей математические модели электродвигателя, механических передач, вентилятора, гидравлического сопротивления теплообменника, сопротивления труб, является сложной задачей. Вследствие невозможности выявления фактического состояния всех элементов системы, изменяющихся во время эксплуатации, АПРП, использующий математическую модель, может быть применён только при первоначальной настройке ЭСОГ [3].

Второй алгоритм предусматривает малые изменения числа оборотов вентилятора (мощности электродвигателей) для получения максимального теплоотвода при минимальном потреблении электроэнергии и даёт решения, оптимальные при длительных стационарных процессах (расход и входная температура газа, входная температура воздуха не изменяются). Полученные решения пополняют банк данных 1. Результат поиска оптимальных решений в виде таблиц зависимостей чисел оборотов двигателей вентиляторов от расхода, входной и выходной температур газа, температуры воздуха может быть записан и использоваться в дальнейшем для управления числами оборотов вентиляторов.

Третий алгоритм подразумевает для каждого вентилятора предварительное снятие в течение небольшого промежутка времени (несколько часов) реальных зависимостей $Q_i(n_i)$ и $N_i(n)$ и вычисление зависимости $Q_i(N_i)$, т. е. определение зависимости теплоотвода от реального потребления электроэнергии электроприводом каждого вентилятора и пополнение банка данных 2. Характеристики снимаются при заданных расходе и температуре газа, температуре окружающей среды, при изменении которых они пересчитываются по известным формулам.

Математическая модель ЭСОГ, используемая в АПРП, позволяет проверить их работу. Целевой функцией алгоритма является минимальное потребление электроэнергии электроприводами вентиляторов $N_\Sigma = \sum_{i=1}^{6} N_i(n_i)$ при условии отвода заданной теплоты $Q_\Sigma = \sum_{i=1}^{6} Q_i(n_i)$. В рассматриваемой постановке задачи управляющим воздействием являются числа оборотов вентиляторов n_i ($i \in \{1...6\}$) и можно рассматривать функции $N_i(n_i)$ и $Q_i(n_i)$. Влияние числа оборотов каждого вентилятора на суммарный теплоотвод будем считать независимым от влияния чисел оборотов других вентиляторов, т. е. суммарный теплоотвод является суммой теплоотводов каждого вентилятора.

Введём следующие расчётные функции:

функцию суммарной теплоты, отведённой всеми модулями,

$$Q_\Sigma := \sum_{i=1}^{6} Q_i(n_i), \qquad (1)$$

где n_i — число оборотов i-го двигателя; $Q_i(n_i)$ — теплота, отводимая i-м вентилятором;

функцию суммарной мощности, потребляемой всеми двигателями,

$$N_\Sigma := \sum_{i=1}^{6} N_i(n_i), \qquad (2)$$

где $N_i(n_i)$ — мощность, потребляемая i-м двигателем.

Обозначим фактическое значение суммарной отводимой теплоты, полученное по показаниям приборов ЭСОГ, $Q_{зад}$, а его допустимую точность — ΔQ.

В блоке алгоритма А0 производится ввод значений температуры и расхода газа для расчёта фактически отводимой теплоты и задание всех необходимых данных для расчёта.

Находится начальное значение оптимальной потребляемой мощности $N_{\min} := N_\Sigma(n_{зад})$ при одинаковых для всех двигателей значениях чисел оборотов $n_{mi} = n_{зад}$ при условии $Q_\Sigma = Q_{зад}$, с которым будут сравниваться расчётные функции (1) и (2) на первом шаге.

Интервал поиска оптимальных значений оборотов n_{mi} рассчитывается в блоках № 3...12 (см. рис. 4).

Для нахождения нижней границы интервала a_i (минимального значения числа оборотов для i-го двигателя) примем числа оборотов всех пяти двигателей вентиляторов, кроме i-го, за максимальные $n_{\max}$ (блок № 1) и вычислим число оборотов i-го двигателя n_i (блок № 3). Если граница ниже 0, то величина a_i принимается равной 0 (блоки № 4...6).

Для нахождения верхней границы интервала b_i (максимального значения числа оборотов для i-го двигателя) примем числа оборотов всех пяти двигателей, кроме i-го, за нуль и вычислим число оборотов i-го двигателя n_i (блок № 7). Если верхняя граница выше максимального значения числа оборотов, то величина b_i принимается максимальной (блоки № 8...10).

В блоке № 11 рассчитывается шаг изменения числа оборотов:

$$h_i := \frac{b_i - a_i}{m}, \qquad (3)$$

где $m_i := m_{зад}$ — заданное число шагов.

В блоках № 16...21 проверяется, выполнен ли расчёт для последнего шага по каждому из вентиляторов.

Если условия в блоках № 16...21 (окончание расчёта по всем двигателям) не выполнены, то с каждым шагом программа производит расчёт суммарной отведённой теплоты Q_Σ и суммарной потребляемой мощности N_Σ (блоки № 13, 14) и проверяет условия

$$\left|Q_\Sigma - Q_{зад}\right| < \Delta Q, \qquad (4)$$

$$N_\Sigma < N_{\min}. \qquad (5)$$

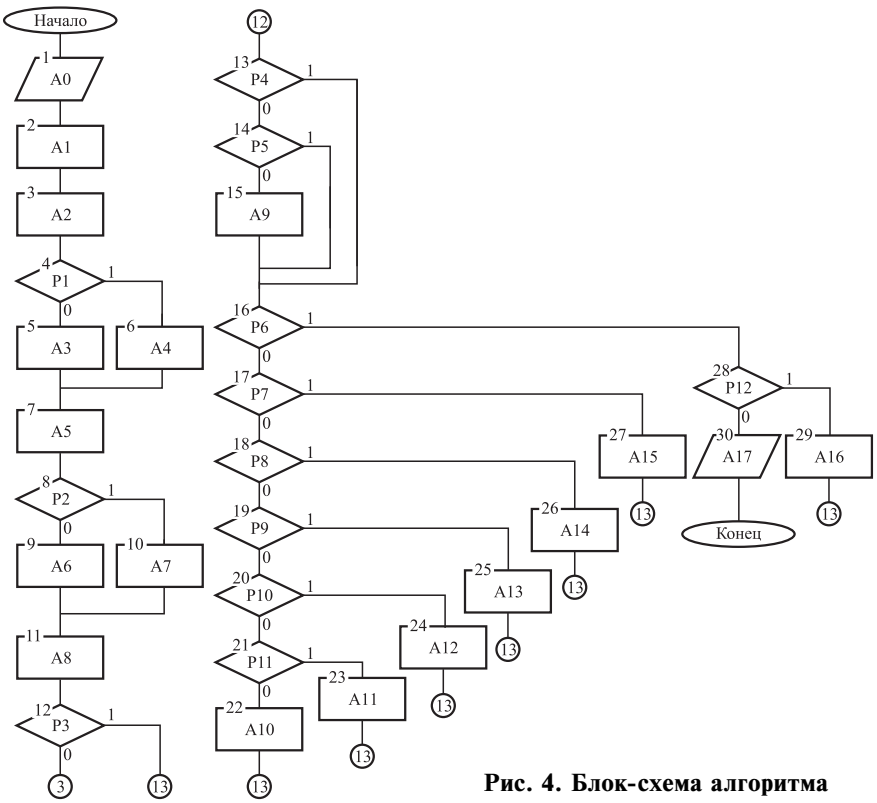


Рис. 4. Блок-схема алгоритма

При выполнении обоих условий в блоке № 15 полученная функция и значения чисел оборотов записываются как оптимальные, в противном случае сохраняются прежние значения:

$$N_{\min} := N_\Sigma, \qquad (6)$$

$$n_{mi} := n_i, i \in \{1 \ldots 6\}. \qquad (7)$$

В блоках № 22...27 осуществляются переход к следующему шагу по каждому вентилятору и приведение в начальное состояние предыдущих вентиляторов.

Если длина шага h_i для каждого двигателя будет удовлетворять требуемой точности расчёта ε (задаётся изначально), т. е. $h_i \leqslant \varepsilon n_{\max}$, то программа выведет полученные оптимальные настройки на частотные преобразователи электродвигателей вентиляторов (блок № 30), в остальных случаях длины интервала поиска и шага изменения числа оборотов уменьшаются (блок № 29):

$$a_i := n_{mi} - h, \qquad (8)$$

$$b_i := n_{mi} + h, \qquad (9)$$

$$h := h/2, \qquad (10)$$

$$m := 4. \qquad (11)$$

Алгоритм возвращается к расчёту минимального значения потребляемой мощности в новом интервале (блок № 13). Блок-схема алгоритма приведена на рис. 4, а операторы используемые в нём, — в таблице.

Разработанный алгоритм реализует классический метод сеток [4], когда функция может иметь кроме основного и локальные экстремумы.

Проведённые расчёты зависимостей отводимой теплоты и потребляемой мощности от числа оборотов показывают возможные пути снижения суммарной мощности, потребляемой электроприводами вентиляторов ЭСОГ.

Исходными зависимостями для расчёта по алгоритму являлись функция зависимости суммарной отводимой теплоты от числа оборотов вентиляторов $Q_\Sigma(n_i)$, а также зависимость суммарной мощности электроприводов от числа оборотов вентиляторов каждого модуля установки $N_\Sigma(n_i)$. Поскольку эти зависимости получены расчётным путём с итерациями, то они заданы дискретно в виде матриц-столбцов, сопоставленных с матрицей чисел оборотов. При этом строке с одинаковым индексом в матрице числа оборотов $n(i)$ соответствует отводимая теплота в матрице Q_i и потребляемая мощность электродвигателя матрицы N_i.

Используя программу расчёта чисел оборотов вентиляторов, при которой получаем минимальное суммарное потребление электроэнергии (алгоритм поиска минимального

Операторы для алгоритма, приведённого на рис. 4

Номер блока	Оператор	Действие или условие	Комментарии
1	A0	1. $Q_\Sigma := \sum_{i=1}^{6} Q_i(n_i)$ 2. $N_\Sigma := \sum_{i=1}^{6} N_{\Sigma i}(n_i)$ 3. $j_1 := j_2 := j_3 := j_4 := j_5 := j_6 := 1$ 4. $n_{\max} := 500$ 5. $m := m_{\text{зад}}$ 6. $n_{m1} := n_{m2} := n_{m3} := n_{m4} := n_{m5} := n_{m6} := n_{\text{зад}}$ 7. $N_{\min} := N_\Sigma(n_{mi})$ 8. $Q_{\text{зад}} = G_{\text{г}} c_{\text{г}} \rho_{\text{г}} (T_{\text{г.вх}} - T_{\text{г.вых}})$ 9. ΔQ 10. ε	1. Задание расчётной функции суммарного тепла, отведённого всеми вентиляторами. 2. Задание расчётной функции суммарной мощности. 3. Задание номера шага по каждому двигателю j_i. 4. Задание максимального значения числа оборотов. 5. Задание числа шагов. 6. Задание начального оптимального значения числа оборотов. 7. Задание начальной оптимальной мощности. 8. Ввод требуемого значения отводимой теплоты; $c_{\text{г}}$ — удельная теплоёмкость газа; $G_{\text{г}}$ — расход газа; $\rho_{\text{г}}$ — плотность газа
2	A1	$i := 1$	Задание начального номера обсчитываемого модуля
3	A2	$n_k := n_{\max},\ k = \{1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6\},\ k \neq i$ $n_i := \varphi\left[Q_\Sigma - \sum_{k=1}^{6} Q_k(n_k)\right]$	Расчёт значения числа оборотов вентилятора при минимальных числах оборотов вентиляторов остальных модулей
4	P1	$n_i < 0$	Условный переход
5	A3	$a_i := n_i$	Задание минимального значения интервала поиска
6	A4	$a_i := 0$	
7	A5	$n_k := 0,\ k = \{1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ 6\},\ k \neq i$ $n_i := \varphi\left[Q_\Sigma - \sum_{k=1}^{6} Q_k(n_k)\right]$	Расчёт значения числа оборотов двигателя при минимальных числах оборотов двигателей остальных модулей
8	P2	$n_i > n_{\max}$	Условный переход
9	A6	$b_i := n_i$	Задание максимального значения интервала поиска
10	A7	$b_i := n_{\max}$	
11	A8	1. $h_i := (b_i - a_i)/m$ 2. $i{:=}i{+}1$	1. Определение величины шага. 2. Смена номера обсчитываемого модуля
12	P3	$i > 6$	Условный переход
13	P4	$\lvert Q_\Sigma - Q_{\text{зад}} \rvert > \Delta Q$	Сравнение полученного значения отводимой теплоты с заданным
14	P5	$N_\Sigma \geqslant N_{\min}$	Сравнение полученного значения мощности с предыдущим
15	A9	$N_{\min} := N_\Sigma$ $n_{mi} := n_i$	Приравнивание оптимальных значений мощности и числа оборотов к полученным (если не выполняются P4 и P5)
16	P6	$j_1 = m$	Переход к увеличению номера итерации для i-го вентилятора
17	P7	$j_2 = m$	
18	P8	$j_3 = m$	
19	P9	$j_4 = m$	
20	P10	$j_5 = m$	
21	P11	$j_6 = m$	
22	A10	$j_6 := j_6 + 1$ $n_6 := n_6 + h$	Увеличение шага расчёта двигателя 6-го вентилятора на 1 и его числа оборотов на h_6
23	A11	$j_5 := j_5 + 1$ $j_6 := 1$ $n_6 := a_6$ $n_5 := n_5 + h$	Увеличение шага расчёта двигателя 5-го вентилятора на 1 и его числа оборотов на h_5. Установка значений предыдущих чисел оборотов в начало интервала и шагов в 1
24	A12	$j_4 := j_4 + 1$ $j_5 := j_6 := 1$ $n_i := a_i,\ i \in \{5...6\}$ $n_4 := n_4 + h$	Увеличение шага расчёта двигателя 4-го вентилятора на 1 и его числа оборотов на h_4. Установка значений предыдущих чисел оборотов в начало интервала и шагов в 1
25	A13	$j_3 := j_3 + 1$ $j_4 := j_5 := j_6 := 1$ $n_i := a_i,\ i \in \{4...6\}$ $n_3 := n_3 + h$	Увеличение шага расчёта двигателя 3-го вентилятора на 1 и его числа оборотов на h_3. Установка значений предыдущих чисел оборотов в начало интервала и шагов в 1

Окончание таблицы

Номер блока	Оператор	Действие или условие	Комментарии
26	A14	$j_2 := j_2 + 1$ $j_3 := j_4 := j_5 := j_6 := 1$ $n_i := a_i,\ i \in \{3...6\}$ $n_2 := n_2 + h$	Увеличение шага расчёта двигателя 2-го вентилятора на 1 и его числа оборотов на h_2. Установка значений предыдущих чисел оборотов в начало интервала и шагов в 1
27	A15	$j_1 := j_1 + 1$ $j_2 := j_3 := j_4 := j_5 := j_6 := 1$ $n_i := a_i,\ i \in \{2...6\}$ $n_1 := n_1 + h$	Увеличение шага расчёта 1-го вентилятора на 1 и его числа оборотов на h_1. Установка значений предыдущих чисел оборотов в начало интервала и шагов в 1
28	P12	$h \geqslant \varepsilon n_{\max}$	Оценка длины шага расчёта на соответствие заданной точности. Если $h < \varepsilon n_{\max}$, то конец расчёта
29	A16	$a_i := n_{mi} - h$ $b_i := n_{mi} + h$ $h := h/2$ $m := 4$ $n_i := n_{mi}$ $j_1 := j_2 := j_3 := j_4 := j_5 := j_6 := 1$	Установка новых границ интервала поиска, величины и числа шагов расчёта
30	A17	$n_1 := n_{m1};\ n_2 := n_{m2}$ $n_3 := n_{m3};\ n_4 := n_{m4}$ $n_5 := n_{m5};\ n_6 := n_{m6}$ $N_{\min} := N_\Sigma$ $\Delta Q = \lvert Q_\Sigma - Q_{зад} \rvert$	Вывод заданного числа оборотов на частотные преобразователи электродвигателей и отображение информации

потребления электроэнергии), получаем матрицы-столбцы минимального потребления электроэнергии $N_{опт}(i)$, матрицу отводимой теплоты $Q_{опт}(i)$ и матрицу распределения числа оборотов электродвигателей $n_m(i)$. Эффект от внедрения алгоритма адаптивного управления ЭСОГ иллюстрирует рис. 5.

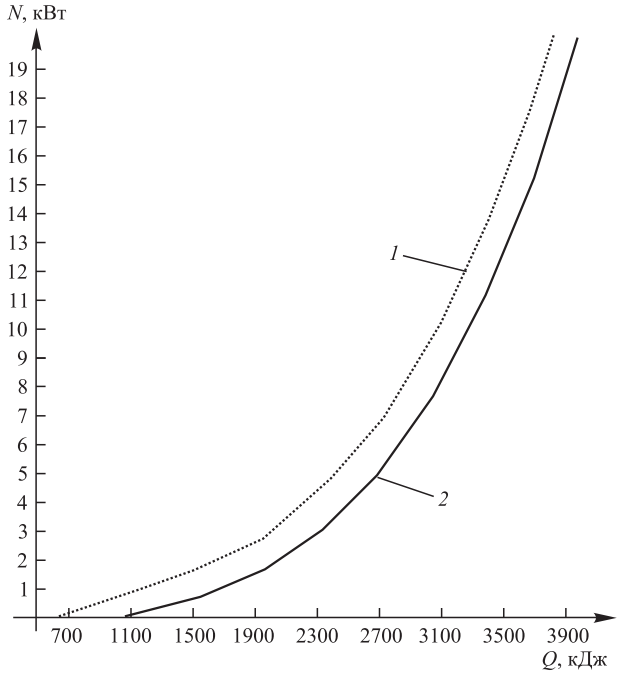


Рис. 5. Потребляемая мощность *N* при равных числах оборотов (*1*) и мощность при оптимально рассчитанных (адаптивных) числах оборотов (*2*)

В среднем снижение потребляемой мощности составляет 0,17 кВт на один модуль установки, 1,02 кВт на установку, состоящую из шести модулей ЭСОГ. Годовая экономия на одном шестимодульном ЭСОГ за счёт использования адаптивного алгоритма управления может составлять

$$1{,}02\ \text{кВт} \cdot 24\ \text{ч} \cdot 365\ \text{дней} = 8935\ \text{кВт} \cdot \text{ч}.$$

Библиографические ссылки

1. **Мигай В.К.** Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергопромиздат, 1987. 264 с.

2. **Селин В.В.** Теплотехника: учеб. для вузов. Калининград: ОГУП «Калининград. кн. изд-во», 2001. 381 с.

3. **Reklaitis G.V., Ravinderan A., Ragsdell K.M.** Engineering Optimization Methods and Applications. N.Y.: J. Wiley & sons, 1983. 684 p.

4. **Браверман Э.М., Мучник И.Б.** Структурные методы обработки эмпирических данных. М.: Наука, 1983. 464 с.

Ссылка для цитирования

Шамаев А.Е., Сердобинцев С.П., Шамаев Е.П. Алгоритм адаптивного управления энергоэффективной системой охлаждения магистрального газа // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 2. С. 55—61.

УДК 004.07

С.П. Саханский, д-р техн. наук, доц., **С.Е. Юленков**
(Сибирский государственный университет науки и технологий
им. акад. М.Ф. Решетнева, г. Красноярск)

Sahanskiy@yandex.ru

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ КОНТАКТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОЩАДИ КРИСТАЛЛОВ, ВЫРАЩИВАЕМЫХ СПОСОБОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

На основе контактного метода измерения рассмотрены основные требования для обеспечения точности измерения площади кристалла, выращиваемого из жидкого расплава по способу Чохральского, на цилиндрической части. В системе управления по координатам перемещения кристалла и тигля обосновано применение фотосчитывающих оптических линеек с дискретностью отсчёта 0,1 мкм. Предложен алгоритм работы установки выращивания кристаллов на основе управления условиями замыкания датчика уровня расплава в тигле, что обеспечивает точность измерения текущей площади кристалла величиной ниже 1 %.

Ключевые слова: выращивание; кристаллы; контактный метод измерения.

The basic requirements ensuring the measurement accuracy of a crystal area grown on a cylindrical part from a liquid melt by the Chokhralski method are considered on the grounds of the contact measurement method. In the control system according to the coordinates of moving the crystal and crucible, the application of photo-reading optical lines with a sampling resolution of 0.1 гm in the control system according to the coordinates of moving the crystal and crucible is justified. A work algorithm for the growing crystals installation from a control the sensor closure conditions of the melt level in the crucible, which ensures the accuracy of measuring the current crystal area below 1%, is proposed.

Keywords: growing; crystals; contact measurement method.

Введение. В последнее время большое развитие получил предложенный фирмой Royal Radar Establishment метод непосредственного контроля изменения диаметра растущего кристалла путём непосредственного взвешивания самого кристалла или тигля с расплавом [1]. При весовом методе выращивание кристаллов происходит в тигле с внутренним диаметром D, в котором находится жидкий расплавленный металл (рис. 1). Кристалл диаметром d вытягивается из расплава со скоростью вытягивания $V_з$ и скоростью вращения $W_з$ кристалла. Выращиваемый кристалл помещён в закрытую тепловую оснастку для обеспечения необходимых температурных условий роста. Процесс проводится в камере с инертным газом или в вакууме. Температура $T_з$ расплава поддерживается за счёт управления мощностью нагревателя с использованием показаний датчика температуры боковой поверхности нагревателя. Управление осуществляет стандартный регулятор температуры. Вес убывающего расплава в тигле измеряется системой взвешивания тигля. Система управления на базе ЭВМ вычисляет разностный сигнал управления как функцию отклонения текущей площади кристалла от заданной на основе вычисленных перемещений кристалла и изменения веса убывающего расплава в неподвижном тигле, вводя корректирующий сигнал управления по температуре в мощность нагрева и скорость вытягивания кристалла.

Применение систем автоматического управления на основе весового метода измерения текущей площади при выращивании монокристаллов германия привело к значительным трудностям из-за сложности точной передачи изменения веса убывающего расплава в тигле, поэтому был разработан новый контактный метод измерения текущей площади выращиваемого кристалла.

Контактный метод измерения текущей площади кристалла. В работе [2] предложен оригинальный способ контроля процесса выращивания монокристалла по способу Чохральского, который основан на использовании в качестве программатора шаблона, имитирующего кристалл заданной формы. Тигель с расплавом и контейнер с жидкостью поме-

щают на верхнечашечные лабораторные весы. В процессе роста шаблон погружают в жидкость с той же скоростью, с какой кристалл вытягивается из расплава. Шаблон и кристалл соединены гибкой тягой. Равновесие сохраняется, если количество твёрдой фазы и жидкости, вытесняемой шаблоном в единицу времени, одинаково. При нарушении равновесия (уменьшении или увеличении диаметра кристалла) сигнал рассогласования весов после оптоэлектронного преобразователя и усиления используется как программирующий для температурного контроля нагревателя совместно с сигналом от термопары. Микропроцессорные системы управления выращиванием кристаллов германия, разработанные на основе патентов [3, 4] с контактным методом измерения текущей площади кристалла, были внедрены в полупроводниковое производство (выращивание) кристаллов.

Работа данных систем управления (рис. 2) заключается в следующем: под контролем системы управления в камере производится выращивание кристалла диаметром d со скоростями выращивания $V_з$ и вращения кристалла $W_з$, при этом расплавленный металл, находящийся в тигле с внутренним диаметром D, вращается с угловой скоростью $W_т$ по мере убывания расплава в тигле.

Сигнал с контактного датчика подаётся через фильтры C1, R1, R2 и блок согласования в ЭВМ для принятия решения о подъёме тигля вверх, который осуществляется блоком управления шаговым двигателем. Кроме скорости подъёма тигля вверх $V_т$ в системе происходит формирование информации о перемещении тигля $X_{итц}$ (с дискретностью $x_т$) и информации $X_{изц}$ о перемещении кристалла (с дискретностью $x_з$). Управление от ЭВМ скоростями выращивания кристалла $V_з$, вращения кристалла $W_з$ и вращения тигля $W_т$ осуществляется через соответствующие приводы. Управление температурой расплава осуществляется на основе формирования задания температуры $T_з$ от ЭВМ на регулятор температуры с обратной связью по датчику температуры боковой поверхности нагревателя.

Основы работы систем управления при контактном методе измерения текущей площади выращиваемых кристаллов. Управление скоростью выращивания кристалла $V_з(x)$, температурой боковой поверхности нагревателя $T_з(x)$, скоростью вращения кристалла $W_з(x)$ и тигля $W_т(x)$ формируется на основе следующих выражений:

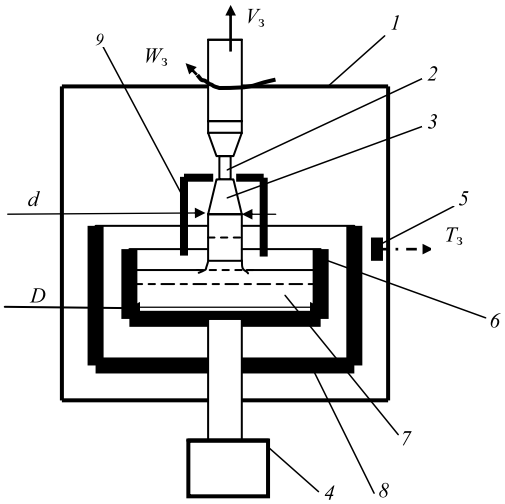


Рис. 1. Схема весового метода измерения при выращивании кристаллов:
1 — камера; *2* — затравка; *3* — кристалл; *4* — весы; *5* — датчик температуры; *6* — тигель; *7* — расплав металла; *8* — нагреватель; *9* — тепловая оснастка

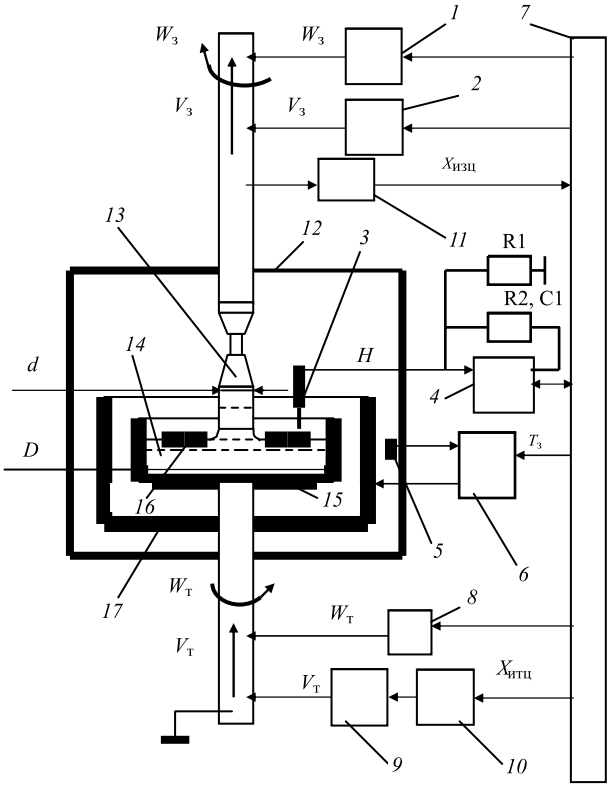


Рис. 2. Система управления на основе контактного метода измерения:
1 — привод вращения затравки; *2* — привод перемещения затравки; *3* — контактный датчик; *4* — блок согласования с ЭВМ; *5* — датчик температуры; *6* — регулятор температуры; *7* — ЭВМ; *8* — привод вращения тигля; *9* — шаговый двигатель; *10* — блок управления шаговым двигателем; *11* — датчик перемещения затравки; *12* — камера; *13* — слиток; *14* — расплав металла; *15* — тигель; *16* — экран; *17* — нагреватель

$$V_з(x) = V_{зп}(x) + ZK_V y;$$
$$T_з(x) = T_{зп}(x) + ZA_T \int y dx;$$
$$W_з(x) = W_{зп}(x);$$
$$W_т(x) = W_{тп}(x),$$

где K_V — пропорциональный коэффициент регулирования по скорости; A_T — интегральный коэффициент регулирования по температуре; $V_{зп}(x)$, $W_{зп}(x)$, $W_{тп}(x)$, $T_{зп}(x)$ — программное задание закона изменения технологических параметров; $V_з(x)$, $W_з(x)$, $W_т(x)$, $T_з(x)$ — общее управление технологическими параметрами; Z — признак захвата управления по диаметру на цилиндрической части кристалла; x — перемещение вдоль оси кристалла; y — сигнал управления по отклонению текущей площади выращиваемого кристалла от заданной.

Процесс стабилизации диаметра кристалла происходит при включении признака захвата управления по диаметру (Z = 1) на цилиндрической части кристалла на основе сигнала управления y. Программные задания технологических параметров процесса выращивания кристалла германия $V_{зп}(x)$, $W_{зп}(x)$, $T_{зп}(x)$ в микропроцессорных системах были основаны на задании кадровой системы управляющих параметров, где в каждом кадре записаны скорость, направление изменения параметра и время кадра. Если задать геометрию выращиваемого кристалла и его осевой градиент в твёрдой части, то можно предварительно смоделировать задание скорости и температуры выращивания на всех участках кристалла по разработанной автором модели роста [5].

Рис. 3. Микропроцессорная система управления вытягиванием монокристаллов германия

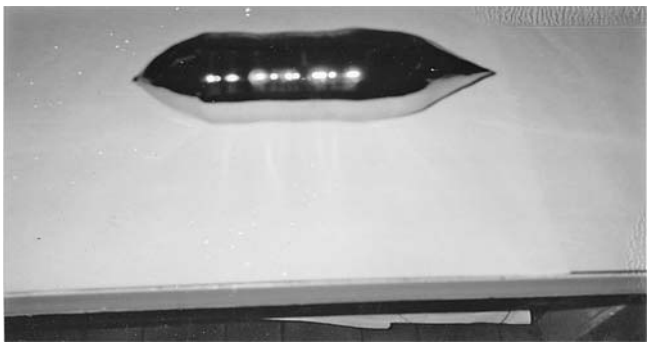


Рис. 4. Слиток германия диаметром 104 мм

Конструктивное исполнение системы автоматического управления вытягиванием монокристаллов германия приведено на рис. 3, а на рис. 4 показан вид выращенного монокристаллического слитка германия диаметром 104 мм.

Основой для контактного метода контроля и управления выращиванием кристаллов [6—10] является управление текущей площадью (или диаметром при круглой форме) растущего кристалла по сигналу управления y, вычисленному как функция отклонения текущей площади кристалла от заданной с использованием перемещений кристалла $X_{зц}$ и тигля $X_{тц}$ за период $T_ц$ оценки сигнала управления y. От точности определения сигнала управления y и отсутствия в вычисленном значении значительных помех напрямую зависит форма выращиваемого кристалла на его цилиндрической части.

Скорость убывания расплава в тигле $V_р$, увеличенная скорость подъёма тигля вверх $V_{тм}$ после размыкания контактного датчика и замедленная скорость подъёма тигля после замыкания контактного датчика $V_{тм}/M$ определяют по выражениям (1)—(5), в которых введены коэффициенты увеличения скорости (C = 4) и уменьшения скорости подъёма тигля (M = 4), что нашло применение при выращивании цилиндрической части кристалла и обеспечивает периодическое замыкание и размыкание контактного датчика в диапазоне изменения уровня расплава порядка 1—2 мкм:

$$V_р = V_з \frac{\rho_т}{\rho_ж}\left[\frac{d}{D}\right]^2; \quad (1)$$

$$V_т = V_{тм} = V_р\left[\frac{d_{max}}{d}\right]^2 = V_з \frac{\rho_т}{\rho_ж}\left[\frac{d_{max}}{D}\right]^2; \quad (2)$$

$$d_{max} = d_1 \frac{1}{\sqrt{1 - 1/C}}; \quad (3)$$

$$V_т = \frac{V_{тм}}{M} = V_р\left[\frac{d_{min}}{d}\right]^2 = V_з \frac{\rho_т}{\rho_ж}\left[\frac{d_{min}}{D}\right]^2; \quad (4)$$

$$d_{min} = d_{max} \frac{1}{\sqrt{M}}, \quad (5)$$

где $V_т$ — скорость подъёма тигля; $V_р$ — скорость убывания расплава в тигле; $V_з$ — скорость выращивания кристалла; d — текущий диаметр кристалла; D — внутренний диаметр тигля; $\rho_т$ — удельная плотность твёрдого материала; $\rho_ж$ — удель-

ная плотность жидкого материала; d_1 — заданный диаметр выращиваемого кристалла на цилиндрической части; d_{max} — максимально допустимый диаметр выращиваемого кристалла, с соблюдением которого выполняется основное условие, когда датчик и экран сомкнутся после размыкания; d_{min} — минимально допустимое значение диаметра кристалла, при котором соблюдается условие отставания экрана от датчика после его замкнутого состояния.

При выращивании прямого и обратного конуса кристалла для управления скоростью перемещения тигля вверх применяется условие полной остановки подъёма тигля в моменты замкнутого состояния датчика уровня расплава ($M = \infty$).

Для контактного метода измерения сигнал управления y, величина перемещения затравки $X_{зц}$ и тигля $X_{тц}$ за время оценки $T_ц$ могут быть представлены в виде следующих выражений:

$$y = X_{итц}\frac{K_у}{AB} - \frac{X_{изц}}{A};$$

$$K_у = B\frac{x_т\rho_ж}{x_з\rho_т}\left[\frac{D}{d_1}\right]^2;$$

$$y = \frac{X_{изц}}{A}\left(\left[\frac{d}{d_1}\right]^2 - 1\right);$$

$$X_{зц} = X_{изц}x_з;$$

$$X_{тц} = X_{итц}x_т,$$

где A, B — коэффициенты масштабирования; $K_у$ — уставка заданного диаметра (площади) выращиваемого кристалла; $X_{изц}$ — перемещение затравки с дискретностью отсчёта $x_з$; $X_{итц}$ — перемещение тигля с дискретностью отсчёта $x_т$; $x_з$ — дискретность отсчёта перемещения затравки; $x_т$ — дискретность отсчёта перемещения тигля.

В качестве привода подъёма тигля для управления скоростью подъёма вверх применяют разомкнутый шаговый привод с шаговым двигателем, обеспечивающий процесс многократного изменения скорости подъёма тигля по сигналу с контактного датчика уровня.

Выражения для импульсов перемещения затравки $X_{изц}$, тигля $X_{итц}$ и времени $T_ц$ оценки сигнала управления y можно представить в виде

$$X_{изц} = \frac{X_{итц}K_у}{B};$$

$$T_ц = \frac{X_{изц}x_з}{V_з} = \frac{X_{зц}}{V_з} = \frac{X_{итц}K_у x_з}{BV_з},$$

где $T_ц$ — период оценки сигнала управления (время отработки заданного количества импульсов $X_{итц}$ или $X_{изц}$).

Примем за время оценки $T_ц$ сигнала управления y на цилиндрической части выращиваемого кристалла время выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$ (в процессе убывания расплава в тигле) в соответствии с выражениями

$$X_{тц} = X_{зц}\frac{\rho_т}{\rho_ж}\left[\frac{d_1}{D}\right]^2;$$

$$T_ц = \frac{X_{тц}}{V_з}\left[\frac{D}{d_1}\right]^2.$$

Время суммарного движения t в процессе замыкания контактного датчика с замедленной скоростью и время суммарного движения с увеличенной скоростью движения тигля после размыкания датчика $t_д$, а также число циклов $K_ц$ по замыканию и размыканию датчика за период оценки сигала управления $T_ц$ можно представить в виде выражений

$$t_д(d) = t\frac{\left[1 - \left(\frac{d_{min}}{d}\right)^2\right]}{\left[\left(\frac{d_{max}}{d}\right)^2 - 1\right]};$$

$$K_ц = \frac{T_ц}{(t_д + t)},$$

где t — время движения тигля с замедленной скоростью $V_{тм}/M$ после замыкания датчика за период оценки сигала управления; $t_д$ — время движения тигля с увеличенной скоростью $V_{тм}$ после размыкания датчика за период оценки сигнала управления; $K_ц$ — число циклов замыкания и размыкания датчика за время $T_ц$.

Точность контактного метода измерения текущей площади выращиваемого кристалла. В рассматриваемой системе управления установкой вытягивания германия применена временна́я диаграмма управления (рис. 5) при выращивании цилиндрической части кристалла,

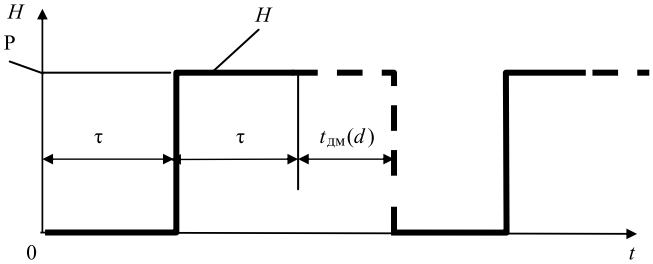


Рис. 5. Временна́я диаграмма работы датчика уровня: H — работа контактного датчика уровня (P – датчик разомкнут)

состоящая в том, что в системе управления в момент замыкания контактного датчика необходимо выдержать программную паузу τ замкнутого и последующую паузу τ разомкнутого состояния датчика уровня. Во время пауз τ состояние контактного датчика системой управления не анализируется и управление подъёмом тигля происходит с замедленной и увеличенной скоростью подъёма тигля в моменты «условно» замкнутого и «условно» разомкнутого состояний датчика уровня.

После выдержки двух пауз происходит анализ условий замыкания датчика уровня расплава и управление приводом перемещения тигля вверх.

Данное управление повышает помехозащищённость метода вычисления текущей площади на цилиндрической части выращиваемого кристалла за счёт отсутствия реакции системы на срабатывания контактного датчика в моменты двух пауз.

Величина размыкания уровня расплава на цилиндрической части выращиваемого кристалла $L_р$ задаётся в пределах 2 мкм. Время паузы τ и время $t_{дм}(d)$ замыкания датчика (после двух пауз) можно представить в виде следующих выражений при условии размыкании датчика расплава на величину $L_р$:

$$\tau = \frac{L_р T_ц}{X_{тц}\left[\left(\frac{d_{max}}{d_1}\right)^2 - 1\right]};$$

$$t_{дм}(d) = \tau\frac{\left[1 - \left(\frac{d_{min}}{d}\right)^2\right]}{\left[\left(\frac{d_{max}}{d}\right)^2 - 1\right]} - \tau,$$

где τ — время движения тигля с замедленной скоростью $V_{тм}/M$ после замыкания датчика (при убывании расплава на величину $L_р$); $t_{дм}(d)$ — время движения тигля с увеличенной скоростью $V_{тм}$ после выдержки двух пауз τ до замыкания датчика.

Число циклов $K_ц$ по замыканию и размыканию датчика за период оценки сигнала управления $T_ц$ можно представить в виде выражения

$$K_ц = \frac{T_ц}{[t_{дм}(d) + \tau 2]},$$

где $K_ц$ — число циклов замыкания и размыкания датчика за время $T_ц$.

Число замыканий контактного датчика $K_ц$ за период оценки $T_ц$ должно находиться в пределах 5...10, при этом необходимо обеспечить условие постоянного вращения графитового экрана в течение всего технологического процесса за счёт наличия лёгкой выпадающей графитовой иголки на конце датчика, имеющей фиксированное нижнее положение.

По значению y можно оценить величину вычисляемого сигнала управления, представленную на рис. 6.

Погрешность r в вычислении сигнала управления в зависимости от точности стабилизации уровня расплава в тигле можно представить в виде следующего выражения, графически представленного на рис. 7:

$$r = \frac{x\rho_ж}{x_з\rho_т}\left[\frac{D}{d_1}\right]^2,$$

где r — погрешность в вычислении сигнала управления за цикл измерения; x — точность стабилизации уровня расплава в тигле.

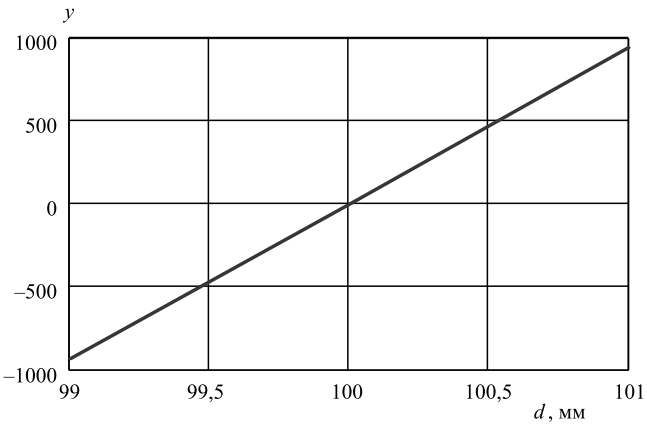


Рис. 6. Зависимость сигнала управления *y* от отклонения текущего диаметра *d* от заданного d_1 при d_1 = 100 мм; $x_з$ = 0,02127 мкм; $X_{зц}$ = 1000 мкм; А = 1

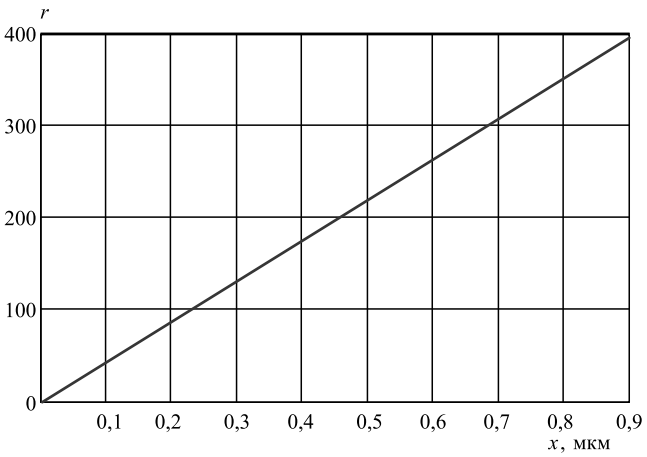


Рис. 7. Погрешность сигнала управления *r* в зависимости от точности стабилизации уровня расплава в тигле *x* при $x_з$ = 0,0216 мкм; d_1 = 100 мм; *D* = 300 мм; *A* = 1; $\rho_т$ = 5,35 г/см^2; $\rho_ж$ = 5,57 г/см^2

При коэффициенте $A = 1$ сигнал управления y, величину перемещения затравки $X_{зц}$ и тигля $X_{тц}$ за время оценки $T_ц$ можно представить в виде выражений

$$y = \frac{X_{тц}\dfrac{\rho_ж}{\rho_т}\left[\dfrac{D}{d_1}\right]^2 - X_{зц}}{x_з};$$

$$X_{зц} = V_з T_ц + A_з \sin\left(\frac{V_з t}{H_з} + \varphi_з\right);$$

$$X_{тц} = V_з T_ц \left[\frac{d_1}{D}\right]^2 + A_т \sin\left(\left[\frac{d_1}{D}\right]^2 \frac{V_з t}{H_т} + \varphi_т\right),$$

где $A_т$ — амплитуда помехи по перемещению тигля, мкм; $A_з$ — амплитуда помехи по перемещению затравки, мкм; $V_з$ — скорость выращивания кристалла, мм/с; $H_т$ — шаг винтовой пары по перемещению тигля, мм; $H_з$ — шаг винтовой пары по перемещению затравки, мм; $\varphi_т$ — угол смещения помехи по тиглю, рад; $\varphi_з$ — угол смещения помехи по затравке, рад; t — время процесса вытягивания, с.

Синусоидальные члены учитывают ошибки, возникающие в трапецеидальных винтовых парах с периодичностью шага винта, для систем управления перемещением штока затравки и тигля без обратной связи, что в свою очередь создаёт в системах по перемещению помеху в сигнале управления f, которая примет вид

$$f = \frac{\rho_ж}{\rho_т}\left[\frac{D}{d_1}\right]^2 \left[\frac{A_т}{x_з}\right] \sin\left(\left[\frac{d_1}{D}\right]^2 \frac{V_з t}{H_т} + \varphi_т\right) - \left[\frac{A_з}{x_з}\right] \sin\left(\frac{V_з t}{H_з} + \varphi_з\right).$$

Временна́я зависимость ошибки f приведена на рис. 8, она хорошо согласуется с графиком ошибки измерения (рис. 9), полученным при работе промышленной установки. Ошибка f соответствует неточности изготовления винтовой передачи в пределах шага винтовых пар трапецеидальной формы и обусловлена неточностью стабилизации уровня расплава. Из рис. 9 видно, что ошибка f имеет сложный периодический вид.

Так как в реальном процессе выращивания фаза сигналов ошибки $\varphi_т$ и $\varphi_з$ носит случайный характер, то учесть и компенсировать данную ошибку на основе проверки и тестирования установки вытягивания программными средствами оказалось невозможным.

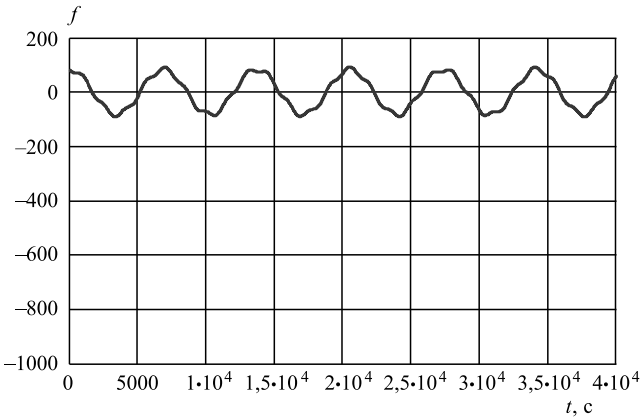


Рис. 8. Временна́я зависимость ошибки регулирования f при $x_т$ = 0,0266 мкм; $x_з$ = 0,0216 мкм; $A_т$ = 0,2 мкм; $A_з$ = 0,2 мкм; d_1 = 100 мм; D = 300 мм; $H_т$ = 2 мм; $H_з$ = 4 мм; $\varphi_т = \pi/2$ рад; $\varphi_з = \pi/8$ рад; $V_з$ = 0,0166 мм/с

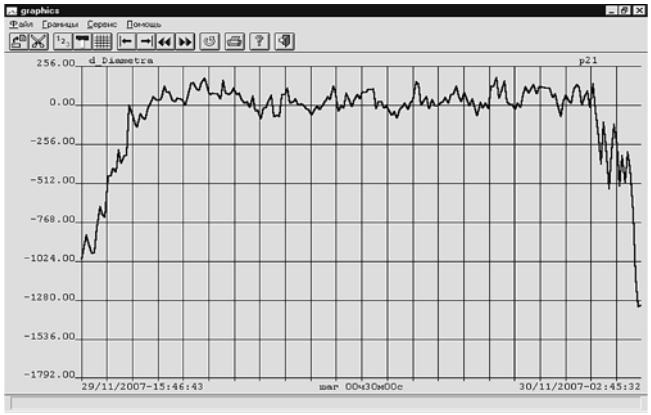


Рис. 9. График изменения сигнала управления y (d_Diametra)

Уменьшение погрешности f возможно за счёт применения прецизионных шариковых винтовых передач или установления в качестве отсчёта перемещений на установке выращивания кристаллов по координатам перемещения затравки и тигля фотосчитывающих оптических линеек с дискретностью отсчёта 0,1 мкм, что является наиболее приемлемым вариантом.

Для устранения ошибки из-за точности стабилизации уровня расплава в тигле r предложен следующий программный алгоритм работы:

за время оценки $T_ц$ сигнала управления y на цилиндрической части выращиваемого кристалла берётся время выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$;

начинается вычисление времени оценки $T_ц$ сигнала управления y в момент замыкания датчика расплава;

заканчивается вычисление времени оценки $T_ц$ сигнала управления y в момент замыкания датчика расплава при условии выборки

заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$;

время оценки $T_ц$ сигнала управления y в предыдущем цикле управления используется в текущем цикле для вычисления паузы замыкания.

Всё это позволяет свести погрешность r в сигнале управления y до 100...150 ед.

Заключение. Для кристаллов, выращиваемых из жидкого расплава по способу Чохральского, при контроле текущей площади кристалла на основе контактного метода измерения текущей площади кристалла определены основные требования для обеспечения точности измерения текущей площади кристалла на цилиндрической части выращиваемого кристалла. В системе управления по координатам перемещения кристалла и тигля необходимо применять фотосчитывающие оптические линейки с дискретностью отсчёта 0,1 мкм.

Для устранения ошибки из-за точности стабилизации уровня расплава в тигле предложен новый программный алгоритм работы установки выращивания кристаллов. За время оценки $T_ц$ сигнала управления y на цилиндрической части выращиваемого кристалла принимается время выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$. Начало и завершение вычисления времени оценки $T_ц$ сигнала управления y происходит в момент замыкания датчика расплава при условии выборки заданного количества импульсов перемещения тигля $X_{тц}$. Время оценки $T_ц$ сигнала управления y, определённое в предыдущем цикле управления, в текущем цикле позволяет произвести вычисление времени замыкания τ как части времени оценки $T_ц$. В системе управления в момент замыкания контактного датчика происходит выдержка τ замкнутого и последующего разомкнутого состояния датчика уровня. Во время выдержки состояние контактного датчика системой управления не анализируется и управление подъёмом тигля происходит с замедленной и увеличенной скоростью подъёма в моменты «условно» замкнутого и «условно» разомкнутого состояний датчика уровня. Это обеспечивает в системе управления точность измерения текущей площади кристалла на цилиндрической части ниже 1 %.

Библиографические ссылки

1. **Bardsley W., Green G.W., Holliday C.H., Hurle D.T.** Weight control method for controlling the diameter of crystals grown by the Czochralski method // J. Grystal Growth. 1972. Vol. 16. No. 3. P. 277—279.

2. **Schmidt F.** Phantom controlled automatic Czochralski growth appparatuss // Crystal Research and Technology. 1981. Vol. 10. № 11. P. 127—128.

3. **Саханский С.П., Подкопаев О.И., Петрик В.Ф.** Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления // Патент России № 2128250. 1999. Бюл. № 9.

4. **Саханский С.П., Подкопаев О.И., Петрик В.Ф., Лаптенок В.Д.** Способ управления процессом выращивания монокристаллов германия из расплава и устройство для его осуществления // Патент России № 2184803. 2002. Бюл. № 19.

5. **Саханский С.П.** Управление формой полупроводниковых кристаллов при выращивании по способу Чохральского // Журнал Сибирского федерального ун-та. Техника и технологии. 2014. № 7(1). С. 20—31.

6. **Саханский С.П.** Погрешность контактного метода измерения текущей площади выращиваемого монокристалла германия // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 2. С. 43—46.

7. **Саханский С.П.** Измерение площади монокристалла в системе автоматического управления выращиванием германия // Мехатроника. Автоматизация. Управление. 2008. № 8. С. 44—48.

8. **Саханский С.П.** Установка выращивания монокристаллов германия на основе контактного метода измерения // Вестник Самарского государственного ун-та им. акад. С.П. Королёва. 2008. № 2. С. 100—105.

9. **Саханский С.П.** Управление процессом выращивания монокристаллов германия: моногр. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 104 с.

10. **Саханский С.П.** Измерение площади кристаллов, выращиваемых из жидкого расплава по способу Чохральского, на основе управления условиями замыкания контактного датчика уровня расплава // Журнал Сибирского федерального ун-та. Техника и технологии. 2015. № 7(8). С. 835—850.

Ссылка для цитирования

Саханский С.П., Юленков С.Е. Анализ точности контактного метода измерения площади кристаллов, выращиваемых способом Чохральского // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 2. С. 62—68.

Уважаемые читатели!

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

УДК 681.5:664.123.6

А.В. Дранников, д-р техн. наук, доц., **А.А. Шевцов,** д-р техн. наук, проф.,
А.В. Квасов, А.Р. Бубнов
(Воронежский государственный университет инженерных технологий)
drannikov@list.ru

ФОРМИРОВАНИЕ КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ КОМБИНИРОВАННОЙ СУШКИ СВЕКЛОВИЧНОГО ЖОМА

Предложен способ многоканального управления процессом комбинированной сушки свекловичного жома в двухзонной сушилке с использованием в качестве теплоносителей воздуха и перегретого пара. Повышение экологической безопасности и технико-экономических показателей процесса достигается за счёт подключения парокомпрессионного теплового насоса, обеспечивающего максимальную рекуперацию и утилизацию теплоты вторичных энергоресурсов в замкнутых термодинамических циклах по материальным и энергетическим потокам.

Ключевые слова: управление; сушка; свекловичный жом; ресурсосбережение.

A method for process multichannel control of the combined drying of beet pressed skins in a two-area dryer through the use of air and superheated steam as heat transfer media is proposed. Improving the environmental safety and technical and economic activities of the process is achieved by connecting the vapor compression heat pump, which ensures maximum recovery and utilization of the secondary energy resources heat in closed thermodynamic cycles on aspects such as material and energy flows.

Keywords: management; drying; beet pressed skins; resource saving.

Сокращение энергетических ресурсов и снижение вредного воздействия свеклосахарного производства на окружающую среду путём внедрения инновационных технологий и современного оборудования всегда были в центре внимания специалистов [1]. В современных условиях возрастающего дефицита энергетических ресурсов всё более актуальными становятся вопросы рационального использования энергии, утилизации и рекуперации теплоты в процессе сушки свекловичного жома [2].

Предпосылкой повышения энергетической эффективности жомосушильного отделения сахарного завода является устойчивый рост спроса на гранулированный жом, как важнейшее сырье для получения высококачественных кормов для сельскохозяйственных животных. Дополнительное стимулирующее развитие связано не только со снижением себестоимости жома, но и с реализацией безотходной и экологически безопасной технологией его сушки [1].

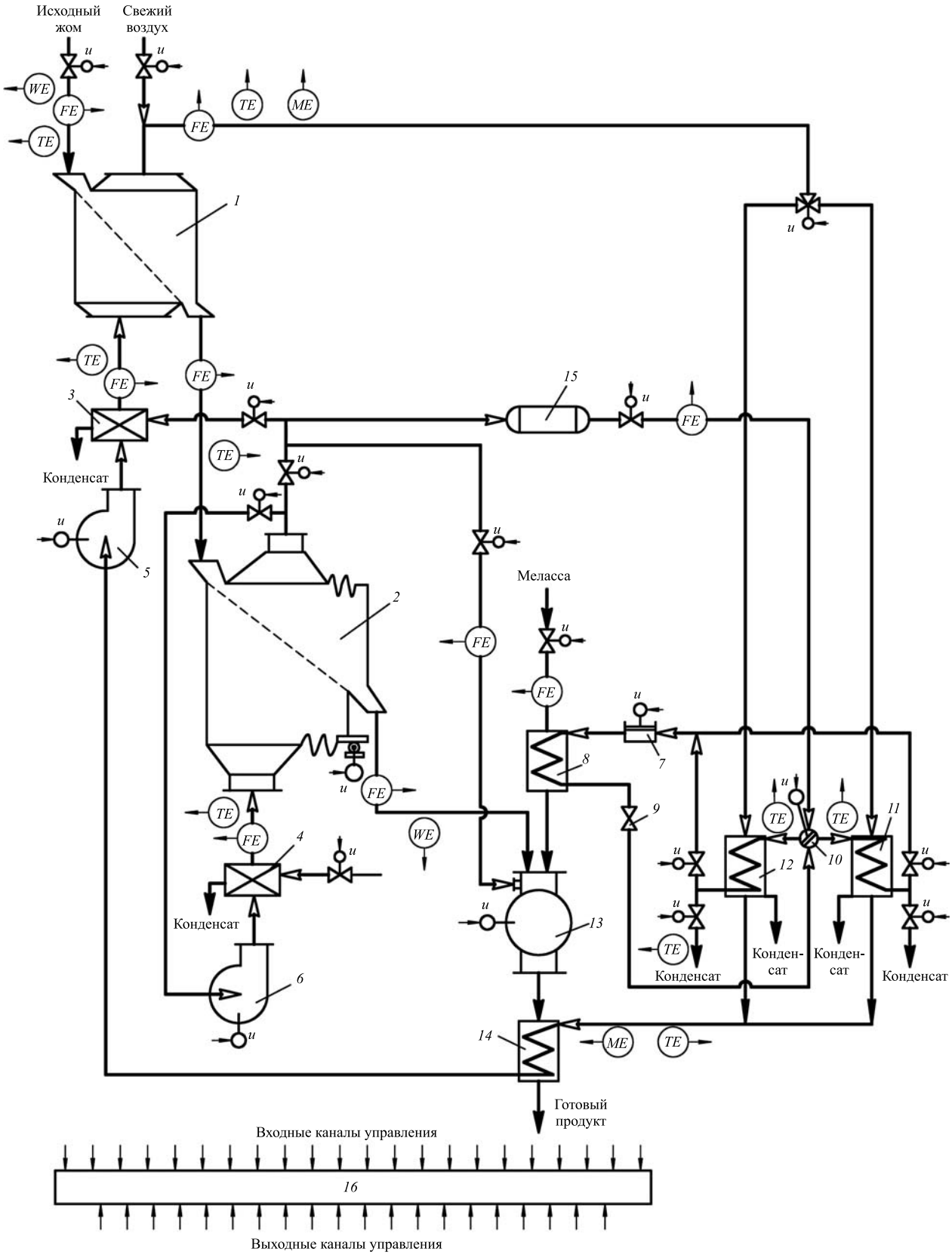
К наиболее перспективной следует отнести технологию позонной сушки жома в переменных режимах, когда в качестве теплоносителей используются воздух и перегретый пар, подаваемые в разные зоны, в которых изменяются температура и скорость теплоносителей, а состояние слоя материала претерпевает изменения, обусловленные управляемой гидродинамикой в рабочем объёме сушильной установки [3, 4].

Формирование многоканального управления процессом сушки жома объясняется необходимостью стабилизации показателей качества продукта в области заданных значений за счёт регулирования температурного и гидродинамического режимов влагоудаления из высоковлажного материала [5].

Особенностью предложенной технологии является сушка жома в две стадии: на первой стадии — подсушка воздухом, а на второй — сушка в среде перегретого пара (см. рисунок). При этом подготовка теплоносителей осуществляется с помощью парокомпрессионного теплового насоса.

Исходный продукт направляется в зону подсушки *1*, где осуществляется его предварительная сушка подогретым воздухом, подаваемым из калорифера *3* с помощью вентилятора *5*. Затем подсушенный продукт направляется в зону сушки *2*, в которой происходит окончательная сушка продукта перегретым паром, нагнетаемым вентилятором *6*. Высушенный продукт подаётся в пресс-гранулятор *13*, куда также вводятся часть отработанного перегретого пара и предварительно подогретая в конденсаторе *8* теплонасосной установки меласса. Полученные гранулы из пресса-гранулятора *13* сначала направляются в теплообменник *14* для охлаждения, а затем выводятся из него.

Отработанный воздух из зоны подсушки *1* подаётся для осушения в рабочую секцию *11*



Многоканальное управление процессом сушки свекловичного жома:
1 — зона подсушки исходного продукта воздухом; *2* — зона сушки продукта перегретым паром; *3* — калорифер; *4* — пароперегреватель; *5*, *6* — вентиляторы; *7* — компрессор; *8* — конденсатор; *9* — терморегулирующий вентиль; *10* — двухпозиционный переключатель потоков; *11*, *12* — рабочая и резервная секции испарителя соответственно; *13* — пресс-гранулятор; *14* — теплообменник; *15* — ресивер; *16* — микропроцессор; *u* — исполнительные механизмы; датчики: *FE* — расхода, *WE* — влажности, *TE* — температуры, *ME* — влагосодержания

испарителя теплонасосной установки. После этого осушенный и охлаждённый воздух сначала направляется в теплообменник *14* для охлаждения гранул, затем в калорифер *3* для подогрева и далее в зону подсушки *1*, образуя контур рециркуляции.

Контур рециркуляции хладагента теплонасосной установки включает в себя последовательно соединённые компрессор *7*, конденсатор *8*, терморегулирующий вентиль *9*, двухпозиционный переключатель *10* и рабочую секцию *11* испарителя.

Теплонасосная установка работает по следующему термодинамическому циклу. Хладагент (рабочее тело) всасывается компрессором *7*, сжимается до давления конденсации и направляется в конденсатор *8*. Конденсируясь, он отдаёт теплоту мелассе. Затем хладагент направляется в терморегулирующий вентиль *9*, где дросселируется до заданного давления. С этим давлением рабочее тело поступает в рабочую секцию *11* и испаряется. Подаваемый в секцию *11* отработанный воздух охлаждается и осушается. Влага, содержащаяся в воздухе, конденсируется в «снеговую шубу» на охлаждающей поверхности рабочей секции. При образовании «снеговой шубы» определённой толщины рабочая секция *11* переключается в режим регенерации — размораживание «снеговой шубы», а секция *12* — в рабочий режим осушения отработанного воздуха.

Переключение секций с режима осушения на режим регенерации осуществляется с помощью исполнительного механизма двухпозиционного переключателя *10* и исполнительных механизмов, работа которых синхронизирована.

Основной поток отработанного перегретого пара из зоны сушки *2* направляется в пароперегреватель *4*, а затем в зону сушки *2*, образуя контур рециркуляции.

Дополнительный поток отработанного перегретого пара подаётся в калорифер *3* для подогрева воздуха. Причём из этого потока предварительно отбирается отработанный перегретый пар, который направляется в пресс-гранулятор *13*, и поток, подаваемый в резервную секцию *12* испарителя, работающую в режиме регенерации. Конденсат отработанного перегретого пара и вода, образовавшаяся при размораживании «снеговой шубы», отводятся из резервной секции *12*.

По информации датчиков о текущих значениях расхода и влажности исходного продукта микропроцессор *16* вычисляет текущее значение влаги, поступающее с исходным продуктом в зону подсушки *1*, и устанавливает расход подогретого воздуха воздействием на мощность регулируемого привода вентилятора *5*. Одновременно по текущему значению температуры исходящего продукта микропроцессор *16* устанавливает расход отработанного перегретого пара, поступающего в калорифер *3*. По результатам сравнения текущего значения температуры подогретого воздуха на входе в зону подсушки *1* с заданной микропроцессор вырабатывает сигнал рассогласования и воздействует на расход отработанного перегретого пара в калорифере *3* до тех пор, пока текущее значение температуры подогретого воздуха на входе в зону подсушки *1* не станет равным заданному.

По текущему значению расхода подсушенного продукта микропроцессор *16* устанавливает расход перегретого пара, поступающего в зону сушки *2*, воздействием на мощность регулируемого привода вентилятора *6*. Одновременно по текущему значению температуры подсушенного продукта микропроцессор устанавливает расход греющего пара в пароперегревателе *4*. Микропроцессор непрерывно вырабатывает сигнал отклонения текущего значения температуры перегретого пара на входе в зону сушки от заданного и воздействует на расход греющего пара в пароперегревателе *4*.

По информации о текущей влажности высушенного продукта микропроцессор вырабатывает сигнал рассогласования на исполнительный механизм, посредством которого воздействует на время пребывания продукта в зоне сушки *2* до тех пор, пока текущее значение влажности высушенного продукта не станет равным заданному.

По текущему значению расхода высушенного продукта микропроцессор *16* устанавливает мощность регулируемого привода пресса-гранулятора *13* посредством исполнительного механизма.

По измеренным значениям влагосодержания воздуха на входе и выходе из зоны подсушки *1* и его расходу микропроцессор определяет количество водяных паров в отработанном воздухе по формуле

$$U = (x_{вых} - x_{вх})\rho_{св}V,$$

где $x_{вх}$, $x_{вых}$ — влагосодержание сушильного агента на входе и выходе из слоя зерна, кг/кг; $\rho_{св}$ — плотность сухого воздуха, кг/м^3; V — объёмный расход воздуха, м^3/ч.

В соответствии с рассчитанным значением U микропроцессор устанавливает расход хладагента, поступающего в рабочую секцию *11* испарителя, воздействием на мощность привода компрессора *7* теплонасосной установки.

Процесс охлаждения отработанного воздуха в рабочей секции испарителя *11* теплонасосной установки сопровождается конденсацией влаги из воздуха в «снеговую шубу» на поверхности её охлаждающего элемента. Это приводит к снижению коэффициента теплопередачи от хладагента к воздуху через стенку охлаждающего элемента. Нарастающая во времени толщина «снеговой шубы» снижает интенсивность охлаждения воздуха.

По информации датчиков о текущем значении расхода и температуры отработанного воздуха из зоны подсушки воздухом *1*, температуры воздуха до и после рабочей секции испарителя *11* микропроцессор *16* непрерывно вычисляет текущее значение коэффициента теплопередачи по формуле

$$k = Q/(F\Delta t_{ср}),$$

где $Q = Vc\rho(t_1 - t_2)$ — количество теплоты, подаваемой отработанным воздухом в рабочую секцию испарителя теплонасосной установки, кДж/ч; c, ρ — средние значения теплоёмкости, кДж/(кг·К) и плотности воздуха, кг/м^3; F — площадь поверхности охлаждающего элемента испарителя, м^2; $\Delta t_{ср} = (t_1 - t_2)/\ln[(t_1 - t_3)/(t_2 - t_3)]$ — среднелогарифмический температурный напор, °С; t_1, t_2 — температура воздуха на входе и выходе из рабочей секции испарителя соответственно, °С; t_3 — температура хладагента на входе в рабочую секцию испарителя-охладителя, °С.

Микропроцессор вырабатывает сигнал отклонения текущего значения коэффициента теплопередачи от заданного интервала значений, по которому воздействует на соотношение расходов «воздух — хладагент» путём изменения расхода хладагента в линии рециркуляции воздействием на мощность привода компрессора *7*. При отклонении текущего значения коэффициента теплопередачи от заданного в сторону уменьшения микропроцессор увеличивает холодопроизводительность теплонасосной установки.

Если увеличение холодопроизводительности (расхода хладагента в контуре теплонасосной установки) не позволяет вывести текущее значение коэффициента теплопередачи на заданный интервал значений, то микропроцессор отключает рабочую секцию *11* из линии рециркуляции хладагента теплонасосной установки и подключает резервную секцию *12* посредством исполнительного механизма двухпозиционного переключателя *10*.

Одновременно микропроцессор переключает направление движения потока воздуха с помощью двухпозиционного переключателя *10* в резервную секцию *12* испарителя теплонасосной установки, которая из режима регенерации переключается на рабочий режим конденсации (охлаждения воздуха).

В случае потерь воздуха в окружающую среду через неплотности или в результате технологических сбоев предусмотрена подпитка линии рециркуляции свежим воздухом из атмосферы.

Излишнее количество отработанного перегретого пара, отводимое по дополнительному потоку, определяется микропроцессором как разность текущих расходов продукта на входе и выходе из зоны сушки *2*. При этом микропроцессор вырабатывает сигнал на отвод излишнего количества отработанного перегретого пара из контура рециркуляции. Расходы отработанного перегретого пара и мелассы в пресс-грануляторе *13* устанавливаются микропроцессором в зависимости от расхода высушенного посредством исполнительных механизмов.

Предусмотрена подача части отработанного перегретого пара на размораживание резервной секции *12* испарителя, работающей в режиме регенерации, которая отключается из контура рециркуляции хладагента теплонасосной установки посредством двухпозиционного переключателя потоков *10*. Микропроцессор *16* устанавливает расход отработанного перегретого пара в резервную секцию *12*, текущее значение которого определяется датчиком расхода. По информации датчиков о текущих значениях температуры отработанного перегретого пара на входе в резервную секцию *12* и температуре конденсата этого пара на выходе из секции *12* микропроцессор *16* определяет значение разности данных температур. При выравнивании значений этих температур (достигается, когда «снеговая шуба» полностью оттаяла и на выходе из резервной секции *12* отводится пар) микропроцессор вырабатывает сигнал исполнительному механизму о прекращении подачи отработанного пара на размораживание резервной секции *12*. При этом отработанный перегретый пар из зоны сушки *2* собирают (накапливают) в ресивере *15*. Необходимость установки ресивера *15* вызвана различной продолжительностью процессов намерзания «снеговой шубы» в рабочей секции и оттайки в резервной секции испарителя, а также возможными технологическими сбоями при распределении потоков отработанного перегретого пара.

Предлагаемый способ многоканального управления процессом сушки свекловичного жома позволяет повысить качество готового

продукта за счёт точности и надёжности управления технологическими параметрами, снизить затраты энергии на единицу массы получаемого продукта на 10...15 % и создаёт условия повышения экологической чистоты производства за счёт исключения выбросов отработанного воздуха в атмосферу.

Библиографические ссылки

1. **Афанасьев В.А.** Комбикормовое производство — состояние и проблемы // Комбикорма. 2008. № 1. С. 9—13.

2. **Шевцов А.А., Дранников А.В., Подрезова А.А., Лесных Т.В.** Сбалансированное теплоснабжение жомосушильного отделения свеклосахарного завода // Вестник ВГУИТ. 2012. № 3. С. 153—156.

3. **Дранников А.В.** Повышение эффективности процесса сушки свекловичного жома перегретым паром: монография. Воронеж: ВГТА, 2010. 172 с.

4. **Дранников А.В.** Способ сушки высоковлажных дисперсных материалов и установка для его осуществления // Патент Российской Федерации № 2487652. Заявл. 20.02.2012. Опубл. 20.07.2013. Бюл. № 20.

5. **Шевцов А.А., Дранников А.В., Барышников С.А., Фурсова Ю.В.** Способ автоматического управления процессом сушки // Патент Российской Федерации № 2298749. Заявл. 30.11.2005. Опубл. 10.05.2007. Бюл. № 13.

Ссылка для цитирования

Дранников А.В., Шевцов А.А., Квасов А.В., Бубнов А.Р. Формирование каналов управления процессом комбинированной сушки свекловичного жома // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 2. С. 69—73.

УДК 621.316.722

И.Н. Швырков, А.В. Юдин, д-р техн. наук, доц.
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)
judinAV@mail.ru

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА НА РЕГУЛИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ В УСТАНОВКАХ ВЫРАЩИВАНИЯ ЛЕЙКОСАПФИРА

Предложена модель влияния конвективного теплообмена на регулирование мощности в установках выращивания лейкосапфира в форме апериодического динамического звена второго порядка. Определены границы допустимого соотношения постоянных времени при идентификации его параметров в системе MatLab. На основании анализа данных об изменении мощности на разных стадиях предложено оценивать интенсивность конвективного теплообмена по изменению постоянной времени процесса.

Ключевые слова: моделирование; идентификация; постоянная времени; конвективный теплообмен; метод Киропулоса; регулирование мощности; расплав.

A model of convective heat transfer effect on power regulation in installations for leucosapphire growing in the form of a second-order aperiodic dynamic link is proposed. The permissible ratio limits of time constants when identifying its parameters in the MatLab system are determined. The intensity of convective heat exchange from the change in the process time constant is proposed evaluate on the grounds of the analysis of data on the change in power at different stages.

Keywords: modeling; identification; time constant; convective heat transfer; Kyropoulos method; power control; melt.

Ростовая установка для выращивания монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса в общем виде представляет собой высоковакуумную печь с резистивным нагревателем (обычно вольфрамовым), керамическими и молибденовыми экранами и водоохлаждаемым корпусом. В печь помещён тигель с поликристаллическим сырьём. Процесс выращивания заключается в расплавлении сырья и вытягивании расплава на затравочный монокристалл при снижении температуры расплава.

Типовой технологический процесс выращивания монокристалла проходит в несколько этапов: получение расплава (разогрев), затравление, рост и охлаждение. Затравление и начало роста являются самыми ответственными этапами. Здесь часто возникают ошибки, связанные либо с очень большим сбросом мощности оператором, ведущим к залипанию кристалла, либо с очень малым, ведущим к остановке роста и даже отрыву кристалла от расплава.

Анализ организации производства на различных предприятиях, занимающихся выращиванием монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса, показывает, что основным направлением исследований является подбор технологом режимов роста исходя из личного опыта. Несмотря на то, что такой подход даёт положительный результат, он обладает рядом существенных недостатков. В первую очередь данный подход субъективен и, обычно, зависит от мнения одного человека — технолога. При этом его знания не формализованы и не структурированы.

Анализ работ по выращиванию монокристаллов лейкосапфира методом Киропулоса показывает, что основные научные исследования и разработки можно разделить на несколько направлений:

моделирование теплового поля ростовой установки в процессе выращивания монокристаллов лейкосапфира [1];

вычисление оптимальных режимов выращивания [2—4];

определение влияния на рост монокристалла дополнительных параметров (таких, как вращение штока в процессе роста [5]);

внесение изменений в конструкцию частей ростовой установки [6].

Следует отметить, что большинство данных исследований проводится не на ростовых установках, а на моделях. При этом не производится никаких исследований, связанных с алгоритмами управления данным технологическим процессом, а также с построением моделей «вход—выход» относительно информационных каналов, имеющихся на установке. Таким образом, обычно происходит попытка повторения результатов, полученных на идеальной модели, на реальной установке.

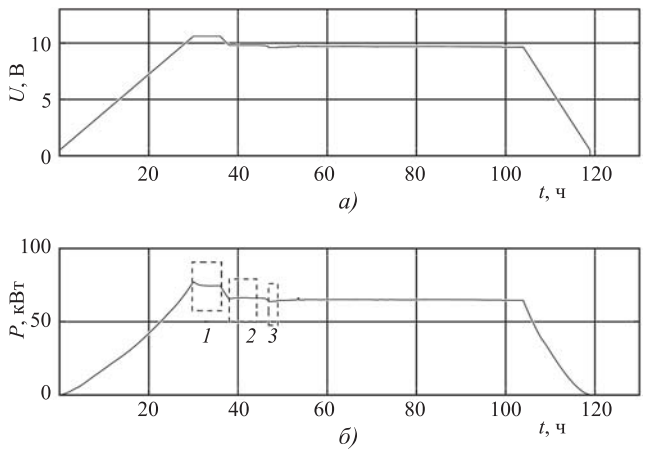


Рис. 1. Общий график нагрева:
а — по напряжению; *б* — по мощности; *1—3* — выделенные участки

Очевидно, что ростовая установка может отличаться от идеальной модели. Кроме того, параметры ростовой установки меняются в процессе роста, что не учитывается в существующих идеальных моделях для расчёта температурных полей.

Метод выращивания и конструкция ростовой установки накладывают ограничения на визуальное наблюдение за процессом роста. Поэтому на первый план выступают косвенные методы, например, основанные на изменении показаний измерителя мощности. Как показано в работе [7], по характеру изменения мощности на нагревателе можно вычислить закон изменения температуры.

При анализе зависимостей напряжения и мощности, полученных в процессе выращивания монокристалла (рис. 1), был выявлен эффект, который заключается в том, что при постоянном значении напряжения мощность длительное время меняет своё значение. Как правило, этому предшествовало значительное ступенчатое изменение напряжения. Процедура ступенчатого сброса напряжения характерна для режима затравления, когда оператор подбирает оптимальный температурный режим. Данный эффект можно объяснить большой инерционностью конвективных потоков в расплаве, которые выносят тепло со дна тигля на поверхность расплава, изменяя распределение температур по высоте вольфрамового высокотемпературного нагревателя. Всё это, учитывая достаточно большой температурный коэффициент сопротивления вольфрама, вызывает переходный процесс изменения мощности после того, как напряжение примет установившееся значение.

Для проверки данного предположения построим модель теплового процесса в расплаве и произведём параметрическую идентификацию объекта, в качестве которого выступает расплав оксида алюминия — сырье для выращиваемого монокристалла лейкосапфира. В качестве базовой модели процесса примем модель расплава, которая представляет собой апериодическое звено второго порядка. Данная модель соответствует каскадному соединению двух инерционных динамических звеньев, первое из которых определяет тепловую инерцию при распространении тепла от нагревателя к тиглю, а второе — тепловую инерцию, связанную с конвективным перераспределением расплава по объёму тигля. При этом соотношение между параметрами этих звеньев заранее не известно.

Прежде чем обрабатывать реальные данные, проверим алгоритмы идентификации на модели с заранее известными параметрами.

Для выявления особенностей идентификации при работе в пакете *ident* системы *MatLab* была создана модель, передаточная функция которой имеет вид

$$W = \frac{K}{(1+\tau_1 S)(1+\tau_2 S)},$$

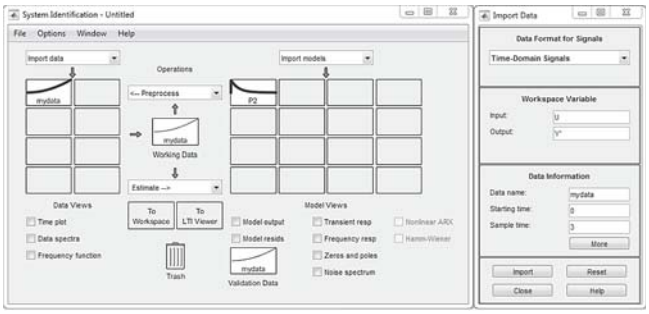
где K — коэффициент передачи объекта; τ_1, τ_2 — постоянные времени объекта; S — оператор Лапласа.

Подаваемый на его вход линейно-нарастающий U и выходной Y сигналы являются исходными данными для работы в пакете идентификации. Постоянную времени τ_1 примем равной единице и будем изменять τ_2. Рассмотрим пример работы в пакете *ident* при $\tau_1 = 1$ с и $\tau_2 = 1000$ с. Импортируем данные типа *Time domain data* (рис. 2)

В главном окне пакета (рис. 2, *а*) выберем модель для оценки данных

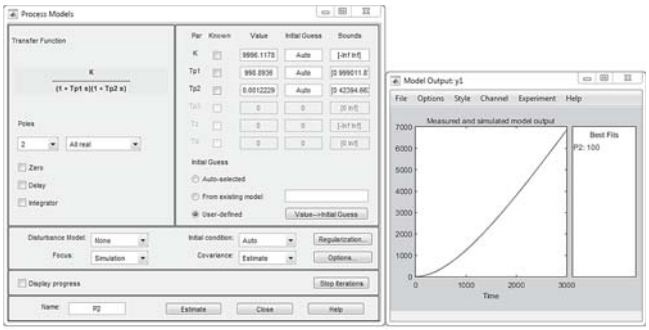
Estimate->Process Models...

В открывшемся окне (рис. 3, *а*) выберем передаточную функцию, которая будет основой для идентификации (в данном случае это апериодическое звено второго порядка).



а) *б)*

Рис. 2. Импортирование данных и их оценка:
а — главное окно пакета; *б* — окно выбора импортируемых данных



а) *б)*

Рис. 3. Окна настройки параметров идентификации и полученных данных:
а — главное окно; *б* — вспомогательное окно

Таблица 1

Результаты идентификации модели

Постоянные времени			
Заданные		Идентифицированные	
τ_1	τ_2	τ_1	τ_2
1	1	0,990	0,99
1	10	0,980	9,99
1	100	0,850	99,90
1	1000	0,001	998,90
1	10 000	0,001	99730,00

После нажатия кнопки *Estimate* пакет рассчитывает значения коэффициента передачи и постоянных времени (в данном случае τ_1 = = Тр2 = 0,001 с, τ_2 = Тр1 = 998,9 с). Полученные результаты можно графически отобразить с помощью установки флажка в пункте *Model output* главного окна пакета (см. рис. 2, *а*)

Несмотря на явное несоответствие по величине τ_1 пакет идентификации показывает, что соответствие полученных данных исходным равняется 100 % (колонка *Best Fits* на рис. 3, *б*). Это обстоятельство требует определения границ допустимого соотношения постоянных времени. Произведём аналогичные действия по идентификации для различных значений τ_2, а полученные результаты сведём в табл. 1.

Сравнение значений τ_1 и τ_2 в табл. 1 показывает, что если постоянные времени объекта отличаются на несколько порядков, то корректно будет идентифицирована только бо́льшая величина. Этого вполне достаточно для дальнейших исследований, поскольку именно бо́льшая постоянная времени определяет влияние конвективного теплообмена.

Проведём идентификацию реального объекта, используя данные напряжения и мощности нагревателя электротермической установки (см. рис. 1), в котором выделим три характерных участка *1...3*. Входным параметром является напряжение нагревателя, выходным — мощность. На рис. 4 показан участок *1*, где значение напряжения поддерживается на уровне 10,6 В, а мощность изменяется в диапазоне от 77,1 до 74,7 кВт (данному значению напряжения предшествовало его линейное нарастание от 0 до 10,6 В).

На рис. 5 показан участок *2*, где значение напряжения поддерживается на уровне 9,8 В, а мощность изменяется в диапазоне от 65,45 до 66,35 кВт (данному значению напряжения предшествовал его линейный спад с 10,6 до 9,8 В).

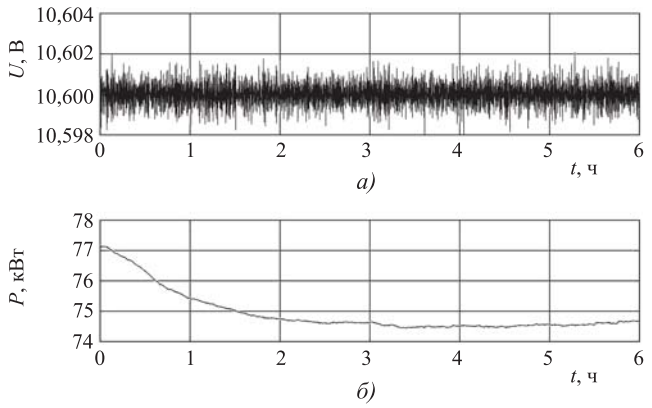


Рис. 4. Участок *1*:
а — изменение напряжения; *б* — изменение мощности

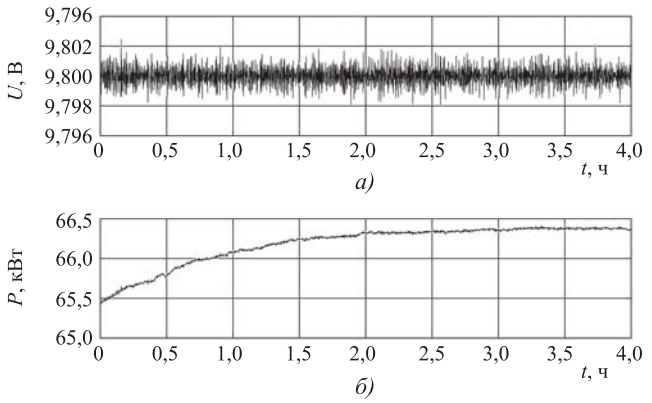


Рис. 5. Участок *2*:
а — изменение напряжения; *б* — изменение мощности

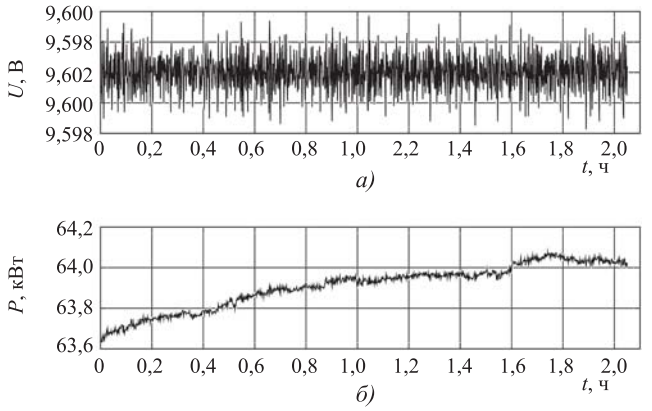


Рис. 6. Участок *3*:
а — изменение напряжения; *б* — изменение мощности

Таблица 2

Результаты идентификации реального объекта

Участок	*K*	τ_1	τ_2	*FTE*, %
1	7,0288	0,012	3083,9	89,61
2	6,7754	44,405	3188,1	92,90
3	6,6784	16,305	4000,7	81,73

Примечание: *FTE* — процент соответствия полученной модели исходным данным.

На рис. 6 показан участок *3*, где значение напряжения поддерживается на уровне 9,6 В, а мощность изменяется в диапазоне от 63,65 до 64 кВт (данному значению напряжения предшествовало его скачкообразное изменение с 9,7 до 9,6 В).

Идентификация данных на рис. 4—6 производилась объектом второго порядка, а полученные результаты сведены в табл. 2

Анализ данных табл. 2 показывает, что наблюдается рост постоянной времени τ_2. Это может быть интерпретировано как процесс остывания расплава и снижения динамики конвективного теплообмена за счёт повышения его плотности. В пользу такого предположения говорит также то обстоятельство, что среднее значение напряжения и мощности на каждом участке снижалось. Величина τ_1 имеет меньшее на несколько порядков значение и, как было показано ранее, не характеризует динамические свойства инерционного звена в составе апериодического звена второго порядка.

Процент соответствия полученной модели исходным данным для трёх участков превышает 80 %, что позволяет сделать вывод об адекватности выбранной модели. Полученная модель позволяет косвенно оценить интенсивность движения тепловых потоков, создающих конвективный теплообмен, что может быть использовано в качестве корректирующего воздействия в системе управления установкой выращивания монокристаллов. В частности, может быть решена задача автоматической компенсации процесса так называемого «самоутепления» ростовой установки, когда при поддержании в течение длительного времени (15...20 ч) напряжения и мощности на фиксированном уровне наблюдается существенный рост температуры на поверхности расплава, что приводит к снижению скорости роста на начальных этапах и даже к необходимости повторного затравления.

Библиографические ссылки

1. **Demina S., Kalaev V.** Analysis of melt flow and crystallization during large-scale Kiropoylos sapphire growth // Presentation during ACCGE-17, USA. 2009.

2. **Еськов Э.В., Игнатов А.Ю., Постолов В.С., Филимонов А.С.** Оптический сапфир, технические требования и технология выращивания кристаллов // Химия твёрдого тела и современные микро- и нанотехнологии. VIII междунар. конф. Ставрополь: СевКавГТУ, 2008. С. 458.

3. **Синельников Б.М., Игнатов А.Ю., Москаленко С.В., Гуднин О.Т.** Исследование кинетики выращивания крупных монокристаллов Al_2O_3 методом

Киропулоса // Химия твёрдого тела и современные микро- и нанотехнологии. VIII междунар. конф. Ставрополь: СевКавГТУ, 2008. С. 458.

4. **Синельников Б.М., Игнатов А.Ю., Москаленко С.В.** Математическое моделирование начальной стадии роста кристаллов сапфира методом Киропулоса // Химия твёрдого тела: монокристаллы, наноматериалы, нанотехнологии. IX междунар. науч. конф. Ставрополь: СевКавГТУ, 2008. С. 427.

5. **Багдасаров Х.С.** Высокотемпературная кристаллизация из расплава. М.: Физматлит, 2004. 160 с.

6. **Амосов В.И.** Способ выращивания монокристаллов из расплава методом Амосова // Патент Российской Федерации № 2 261 297. Опубл. 27.09.2005. Бюл. № 27.

7. **Юдин А.В.** Особенности регулирования мощности на вольфрамовом высокотемпературном нагревателе // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2011. № 2(21). С. 108—112.

Ссылка для цитирования

Швырков И.Н., Юдин А.В. Модель влияния конвективного теплообмена на регулирование мощности в установках выращивания лейкосапфира // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 2. С. 73—77.

УДК 004.4:621.926.5

А.З. Бигалиева
(Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва, Республика Казахстан)
alfija84@mail.ru

РАСЧЁТ СТЕПЕНИ ПОМОЛА СЫРЬЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ANETR5 НА ПРИМЕРЕ ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Рассмотрены процесс измельчения в промышленности и неординарный метод расчёта помола. Описан метод получения результатов помола на планетарной мельнице с применением компьютерных технологий.

Ключевые слова: компьютерные технологии; планетарный механизм; технология помола; анализ результатов помола.

The grinding process in industry and an extraordinary calculation method of the milling are considered. A milling method at a planetary mill through the use of computer technology is described.

Keywords: computer technology; planetary gear; milling technology; analysis of milling results.

Введение. Измельчение — один из наиболее важных процессов в промышленности. На горно-обогатительных комбинатах на него тратится, по разным оценкам, от 5 до 20 % всей электроэнергии мира. На процессы измельчения приходится 50...70 % общих капитальных и эксплуатационных затрат горных предприятий. Основной причиной такой ситуации является доминирование традиционных барабанных шаровых мельниц с низкими эффективностью и удельной производительностью, с высоким уровнем металлоёмкости, площади и объёма производственных зданий, а также с повышенным расходом мелющих тел и футеровок.

Для измельчения используют различные способы. В промышленных измельчителях чаще всего применяют следующие виды механических воздействий: свободный удар, раздавливание, истирание, а также их комбинации. Выбор усилия зависит от крупности и прочности материала.

Планетарные мельницы характеризуются высокой энергонапряжённостью, что позволяет осуществлять измельчение быстро и эффективно.

Энергонапряжённость измельчительного оборудования — это количество механической энергии, передаваемой единице массы измельчаемого вещества в единицу времени [1].

В планетарных мельницах обычно имеются 3 или 4 барабана, вращающихся вокруг центральной оси и одновременно вокруг собственных осей в противоположном направлении. В барабаны загружают измельчаемый материал и мелющие тела. Частицы измельчаемого материала претерпевают множество соударений с мелющими телами и стенками барабана. Эффективность планетарных мельниц обусловле-

на высокой кинетической энергией мелющих тел, благодаря большой скорости их движения создающих высокие напряжения в активируемом веществе.

Энергонапряжённость мельницы можно оценить, разделив её мощность на объём рабочей камеры. Энергонапряжённость планетарной мельницы может в 1000 раз превышать соответствующие параметры шаровых мельниц. Планетарные мельницы, использующие высокие ускорения, характеризуются наиболее высокой энергонапряжённостью по сравнению с аттриторами, вибромельницами, струйными мельницами и дезинтеграторами [2].

Методика проведения эксперимента. Экспериментальные исследования проводились на планетарной мельнице. В качестве материала измельчения была выбрана пшеница для получения цельнозерновой муки.

Факторами, оказывающими влияние на степень помола, были выбраны время помола, а также соотношение объёмов зерна и помолочных тел.

Функцией отклика Y является степень помола зерна. Степень помола оценивалась по результатам ситового анализа, а именно, по количеству измельчённого материала, прошедшего через сито с диаметром отверстий 0,14 мм (140 мкм) и отнесённого к количеству исходного сырья.

Методика решения. Факторное пространство было выбрано на основе литературных данных и предварительно проведённых экспериментов. Опираясь на эти данные, было установлено оптимальное время помола — 2 мин, объём измельчаемого сырья был равен половине объёма мелющих тел, объём которых в свою очередь составлял 25...30 % заполняемости помольных барабанов.

Ранее такая задача была решена с использованием методов математического планирования, и первой операцией при обработке экспериментальных данных являлось получение уравнения регрессии. Для этого использовались экспериментальные данные, представленные в таблице результатов.

Для сокращения числа опытов, в целях автоматизации расчётов и получения результатов, не превышающих допустимую погрешность 20 %, было использовано прикладное программное обеспечение ANETR5, в котором использованы нетрадиционные методы обработки результатов.

Основываясь на данных таблицы были произведены расчёты в программе ANETR5. Результаты расчётов показаны на рис. 1.

При каждом моделировании система выдавала два уравнения по первому и второму

Результаты экспериментальных данных

Номер опыта	X_1	X_2	Масса муки, г			Степень помола, %
	мин	К	после сита	на сите	общая	
1	1,0	0,39	66,15	83,3	149,45	45,4
2	2,0	0,39	130,6	32,54	163,14	85,8
3	1,0	0,77	70,7	257,1	327,8	21,7
4	2,0	0,77	177,06	147,61	324,67	56,8
5	2,0	0,58	155,85	95,65	251,5	62,9
6	1,0	0,58	59,9	185,6	245,74	24,6
7	1,5	0,77	121,2	203,06	324,26	38,8
8	1,5	0,39	105,32	57,11	162,43	74,4
9	1,5	0,58	121,7	117,86	239,56	51,7

факторам, оказывающим влияние на степень помола. На основе коэффициента корреляции (R-Пирсона), который является статистическим показателем зависимости двух случайных величин и может принимать значения от −1 до +1 (−1 — отсутствие корреляции между величинами, 0 — нулевая корреляция, а +1 — полная корреляция величин), в программе были выбраны уравнения для каждой функции отклика:

для определения измельчаемого материала на сите Y_1 было выбрано уравнение

$$Y_1 = \frac{1}{A + BX_1};$$

для определения измельчаемого материала после сита Y_2 —

$$Y_2 = AE^{BX_1};$$

для определения общей массы измельчаемого материала Y_3 —

$$Y_3 = AX_1^2 + BX_1 + C;$$

для определения степени помола измельчаемого материала Y_4 —

$$Y_4 = AX^2 + BX + C.$$

Подставляя определённые значения в данные уравнения и сравнивая полученные результаты с фактическими, была установлена погрешность 6...16 %, что является допустимым.

Частные графические зависимости степени помола от соотношения объёмов сырья и мелющих тел показаны на рис. 2.

Из представленных данных видно, что соотношение объёмов сырья и мелющих тел сильно влияет на эффективность помола зерна. Чем меньше это соотношение, тем выше степень помола. Так, уменьшение соотношения объёма

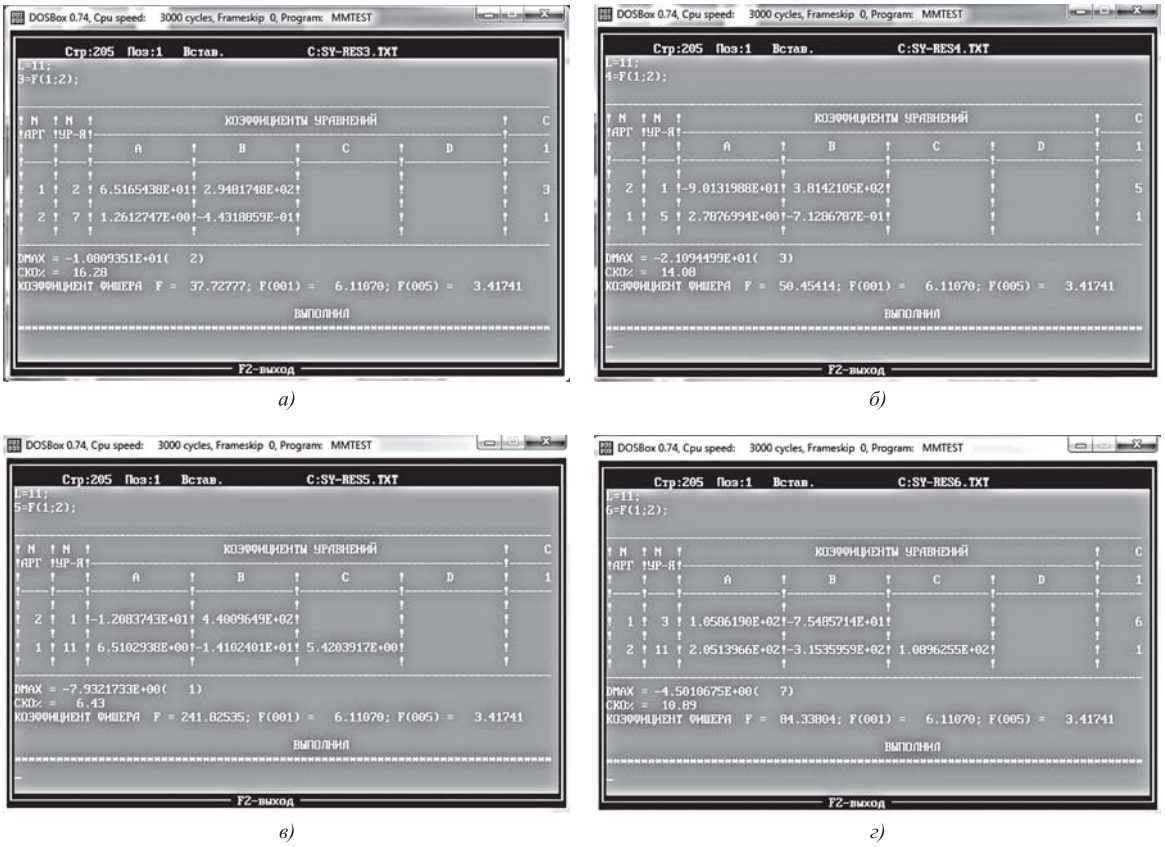


Рис. 1. Результаты расчётов:
а — после сита; *б* — на сите; *в* — общей массы; *г* — по степени помола

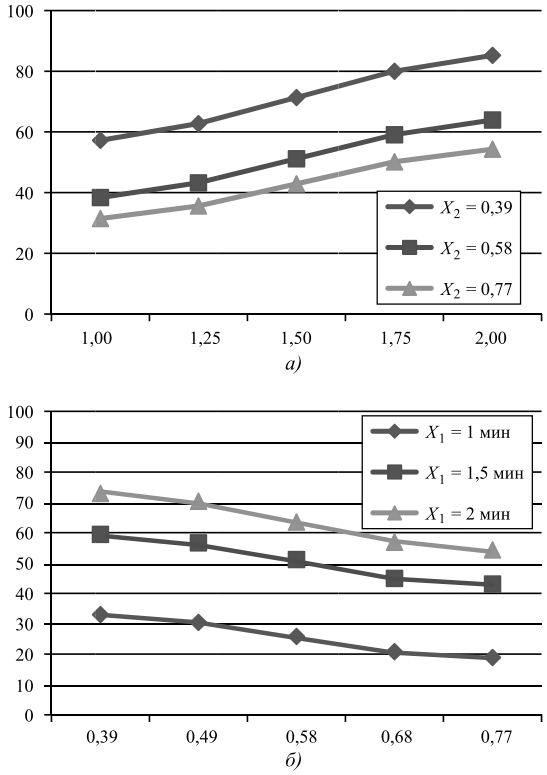


Рис. 2. Частные графические зависимости:
а — степени помола от времени работы планетарной мельницы; *б* — степени помола от соотношения объёмов сырья и мелющих тел

сырья к объёму мелющих шаров с 0,77 до 0,39 приводит к увеличению степени помола от 20 до 33 % (при времени помола 1 мин), от 42 до 59 % (при времени помола 1,5 мин), от 53 до 73 % (при времени помола 2 мин).

То есть при уменьшении соотношения объёмов сырья и мелющих тел в 2 раза степень помола увеличивается в среднем в 1,5 раза.

Вывод. Дальнейшими действиями по данному вопросу будет занесение данных уравнений в среду программирования и получение адекватных данных о качестве помола без проведения дополнительных опытов, что являлось начальной целью.

Библиографические ссылки

1. **Tsetsekou A., Chernik G.** Planetary milling for planetary goals // The Parliament Magazine. 2005. № 6.

2. **Черник Г., Фокина Е., Будим Н., Хюллер М., Кочнев В.** Измельчение и механическое легирование в планетарных мельницах // Наноиндустрия. 2007. № 5.

Ссылка для цитирования

Бигалиева А.З. Расчёт степени помола сырья с применением прикладного программного обеспечения ANETR5 на примере планетарной мельницы // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 2. С. 77—79.

УДК 681.5.015.23+681.515.8+62-523.3

А.М. Макаренков, канд. техн. наук, доц., **Тин Эй Чжо, Аунг Чжо Со**
(Калужский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана)

amm2005@rambler.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА С УЧЁТОМ СЛУЧАЙНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрена проблема повышения точности систем управления с ПИД-регулятором при наличии случайных отклонений параметров объекта управления. Предложен алгоритм оптимизации параметров ПИД-регулятора, основанный на минимизации функционала, выражающего различие статистических характеристик выходного сигнала стохастической и детерминированной систем. Функционал построен с использованием усреднённой проекционной модели стохастической системы. Алгоритм проиллюстрирован на примере совместной оптимизации параметров ПИД-регулятора и параметров корректирующего устройства в составе электрогидравлического следящего привода с одним случайным физическим параметром.

Ключевые слова: система управления; случайные параметры; стохастическая система; матричный оператор; усреднённая проекционная модель; ПИД-регулятор; электрогидравлический следящий привод.

The problem of improving the accuracy of control systems with a PID-controller in the presence of random deviations of parameters of the control object is considered. An algorithm for optimizing the parameters of the PID-controller based on minimizing the functional expressing the difference in the statistical characteristics of the output signal of the stochastic and deterministic systems is proposed. The functional is built through the use of the averaged projection model of the stochastic system. The algorithm is illustrated as an example of the joint optimization of the parameters of the PID-controller and the parameters of the correction device as part of an electro-hydraulic tracking drive with one random physical parameter.

Keywords: control system; random parameters; stochastic system; matrix operator; averaged projection model; PID-controller; electro-hydraulic tracking drive.

Введение. Регуляторы, реализующие пропорционально-интегрально-дифференциальный закон управления (ПИД-регуляторы), широко используются в системах автоматического управления. Сегодня этот тип регуляторов встречается в 90...95 % регулирующих контуров [1]. Ключевым вопросом при использовании ПИД-регулятора была и остается настройка его параметров. Такая настройка может осуществляться как на основе известных методов расчёта указанных параметров, так и с использованием различных методов их автоматической, в том числе адаптивной, настройки, позволяющей учесть изменения параметров объекта управления. При этом реализация принципов автоматической и адаптивной настройки усложняет и удорожает систему управления.

В приложениях, где наряду с требованиями к быстродействию, демпфированию и точности также предъявляются требования к простоте реализации системы управления, возможно определение параметров ПИД-регулятора на основе робастного подхода [2], что позволяет учесть возможные отклонения параметров объекта управления на этапе синтеза регулятора. Однако сведение случайности параметров системы только к их интервальной неопределённости не позволяет учесть специфические особенности поведения систем со случайными параметрами, которые могут при некоторых условиях заметно влиять на точность работы системы управления. Например, наличие неизбежной статистической связи между выходным сигналом и случайными параметрами системы приводит к появлению

дополнительной составляющей в математическом ожидании выходного сигнала, кроме того, случайность параметров системы не только увеличивает дисперсию её выходного сигнала, но и делает эту дисперсию зависимой от среднего значения входного сигнала. Указанные особенности в целом характерны для стохастических систем, к которым может быть отнесено большинство технических систем, физические параметры которых изменяются в реальных условиях эксплуатации под воздействием различных случайных факторов.

Таким образом, учёт специфики стохастических систем наряду с робастным подходом даёт дополнительный резерв повышения точности систем автоматического управления, использующих традиционные ПИД-регуляторы. Целью настоящей работы является совершенствование методов расчёта параметров ПИД-регуляторов за счёт учёта статистических особенностей поведения систем со случайными параметрами. Предлагаемый алгоритм оптимизации коэффициентов ПИД-регуляторов строится на основе проекционных методов решения задач теории управления [3, 4] применительно к классу стохастических систем [5].

Постановка задачи оптимизации параметров регулятора. Систему управления, включающую регулятор и объект управления, будем описывать обобщённой математической моделью «вход — выход» в виде линейного дифференциального уравнения

$$\sum_{i=0}^{n} a_i \frac{d^i}{dt^i} x(t) = \sum_{j=0}^{m} b_j \frac{d^j}{dt^j} y(t),\ a_n \equiv 1,\ n \geqslant m, \quad (1)$$

в котором коэффициенты a_i, b_j являются гауссовыми случайными величинами, определяемыми как

$$\begin{aligned} a_i &= m_{a_i} + \tilde{a}_i,\ i = \overline{0, n-1}; \\ b_j &= m_{b_j} + \tilde{b}_j,\ j = \overline{0, m}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m_{a_i}, m_{b_j} — математические ожидания; $\tilde{a}_i$, $\tilde{b}_j$ — центрированные случайные составляющие.

Начальные условия полагаются нулевыми.

В общем случае полагаем, что входной сигнал $y(t)$ — гауссов случайный процесс, для которого заданы математическое ожидание $m_y(t)$ и корреляционная функция $R_{yy}(t_1, t_2)$. В распространённом на практике частном случае входной сигнал $y(t)$ является детерминированным, но выходной сигнал $x(t)$ при этом всё равно будет случайным вследствие случайности параметров системы. Определяя статистические характеристики выходного сигнала $x(t)$, условимся оставаться в рамках корреляционной теории, т. е. полагать, что случайный процесс $x(t)$, как и процесс $y(t)$, полностью определяется математическим ожиданием $m_x(t)$ и корреляционной функцией $R_{xx}(t_1, t_2)$. Такую оговорку следует сделать по той причине, что стохастическая система, являясь нелинейной относительно параметрических возмущений, искажает нормальный закон распределения случайного процесса $y(t)$, однако степень этого искажения на практике может быть признана незначительной в силу известного эффекта нормализации случайного процесса инерционной динамической системой. Ещё одна причина учитывать только первые два стохастических момента процесса $x(t)$ состоит в том, что в практике инженерных расчётов обычно ограничиваются именно этими характеристиками.

Математическая модель (1) может быть получена из передаточной функции, которая является конечным результатом стандартных структурных преобразований (сворачивания) структурной схемы системы управления, построенной на основе системы дифференциальных уравнений её исходной модели. При этом следует учитывать возможную статистическую связь между коэффициентами уравнения (1), обусловленную тем, что от одного физического случайного параметра (коэффициента одного из уравнений исходной модели) может зависеть более одного коэффициента обобщённой модели (1).

Присутствие регулятора выражается в том, что коэффициенты a_i, b_j в уравнении (1) зависят не только от случайных физических параметров элементов системы управления, но и от параметров регулятора, которые будем полагать детерминированными. В целях упрощения мы не показываем явно эту зависимость в модели (1), подразумевая при этом, что указанные коэффициенты зависят от вектора параметров регулятора $\mathbf{p} = (p_1, p_2, ...)$, т. е. в действительности определяются как $a_i(\mathbf{p})$, $b_j(\mathbf{p})$. Для ПИД-регулятора вектор $\mathbf{p}$ будет состоять из трёх элементов: $p_1 = k_п$, $p_2 = k_и$, $p_3 = k_д$, где $k_п$, $k_и$, $k_д$ — коэффициенты усиления пропорциональной, интегрирующей и дифференцирующей составляющих регулятора соответственно.

Требуется найти такие значения параметров регулятора (элементов вектора $\mathbf{p}$), кото-

рые обеспечивают минимум отличий статистических характеристик сигнала $x(t)$ от статистических характеристик сигнала $\bar{x}(t)$, являющегося выходным сигналом эквивалентной детерминированной системы, также описываемой уравнением (1), где все случайные коэффициенты заменены их математическими ожиданиями. Следует отметить, что имеется в виду тот относительный минимум отличий, который в принципе может быть достигнут оптимизацией параметров конкретного типа регулятора.

Алгоритм оптимизации параметров регулятора. Оптимальные значения параметров регулятора предлагается искать в два этапа. На первом этапе решается задача определения значений параметров регулятора для эквивалентной детерминированной системы. Данная задача может решаться любым из известных методов параметрического синтеза регуляторов детерминированных систем, например проекционным методом синтеза регуляторов, основанным на минимизации функционала, построенного с использованием проекционной модели системы [4]. Данный функционал имеет следующий вид:

$$J_1(\mathbf{p}) = [\mathbf{C}^{x_э} - \mathbf{C}^{x_р}(\mathbf{p})]^{т}[\mathbf{C}^{x_э} - \mathbf{C}^{x_р}(\mathbf{p})], \quad (3)$$

где $\mathbf{C}^{x_э}$ — проекционная характеристика эталонного переходного процесса $x_э(t)$; $\mathbf{C}^{x_р}(\mathbf{p})$ — расчётная проекционная характеристика переходного процесса $x_р(t, \mathbf{p}) = \bar{x}(t)$, вычисленная по проекционной модели эквивалентной детерминированной системы для некоторых значений параметров регулятора (элементов вектора $\mathbf{p}$); ^{т} — знак транспонирования.

Проекционные характеристики функций $x_э(t)$ и $x_р(t, \mathbf{p})$ представляют собой вектор-столбцы коэффициентов разложения данных функций по некоторому ортогональному базису $\mathbf{\Phi}(t) = [\varphi_1(t), ..., \varphi_l(t)]^{T}$. Связь между приближёнными представлениями указанных функций и их проекционными характеристиками для базиса размерности l определяется как

$$x_э(t) \approx x_э^l(t) = \mathbf{\Phi}^{т}(t)\mathbf{C}^{x_э};$$

$$x_р(t, \mathbf{p}) \approx x_р^l(t, \mathbf{p}) = \mathbf{\Phi}^{т}(t)\mathbf{C}^{x_р}(\mathbf{p}).$$

Проекционная модель системы с регулятором, используемая при вычислении $\mathbf{C}^{x_р}(\mathbf{p})$, является результатом проекционной аппроксимации модели эквивалентной детерминированной системы, выполняемой с применением техники матричных операторов [3]. Данная проекционная модель имеет следующий вид:

$$\mathbf{C}^{x_р}(\mathbf{p}) = \bar{\mathbf{A}}(\mathbf{p})\mathbf{C}^{y}, \quad (4)$$

где $\bar{\mathbf{A}}(\mathbf{p})$ — матричный оператор эквивалентной детерминированной системы, вычисляемый с использованием матричного оператора интегрирования [3] и, если коэффициенты уравнения (1) зависят не только от параметров $\mathbf{p}$, но и от времени, матричного оператора умножения [3], построенного, как и оператор интегрирования, для базиса $\mathbf{\Phi}(t)$.

Значения параметров регулятора определяются в результате минимизации функционала (3), т. е. вектор параметров регулятора эквивалентной детерминированной системы определяется как

$$\bar{\mathbf{p}} = \arg\min_{\mathbf{p}\in\mathbb{R}} J_1(\mathbf{p}).$$

Минимизация функционала $J_1(\mathbf{p})$ может быть выполнена любым из известных методов прямого поиска экстремума с проверкой на каждом шаге устойчивости системы и соответствия качества её переходного процесса некоторым выбранным критериям. Данные условия имеют вид ограничений, определяющих допустимые значения параметров регулятора. При этом может потребоваться введение дополнительных ограничений, связанных с конструктивными особенностями конкретного типа регулятора. Выбор вектора начальных значений параметров регулятора $\mathbf{p}_0$ зависит от типа регулятора. В частности, для ПИД-регулятора в качестве начальных значений целесообразно выбрать $k_п = 1$, $k_и = 0$, $k_д = 0$, что фактически соответствует отсутствию регулятора.

На втором этапе выполняется повторная оптимизация параметров регулятора с учётом влияния случайности параметров системы путём минимизации функционала, выражающего меру отличия проекционной характеристики математического ожидания и проекционной характеристики корреляционной функции выходного сигнала $x(t)$ стохастической системы от соответственно проекционной характеристики математического ожидания и проекционной характеристики корреляционной функции выходного сигнала $\bar{x}(t)$ эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$, найденными на первом этапе. Данный функционал имеет следующий вид:

$$J_2(\mathbf{p}) = \left[\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l}[c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})]^2\right]^{1/2} + \left[\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=1}^{l}[c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})]^2\right]^{1/2}. \quad (5)$$

В выражении (5) $c_{ij}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$ и $c_{ij}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$ — элементы квадратных матриц $\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p})$ и $\mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p})$. Данные матрицы определяются как

$$\mathbf{C}^{\varepsilon_{m_x}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})[\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})]^{\mathrm{T}} - \mathbf{C}^{m_{\bar{x}}}(\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}})^{\mathrm{T}};$$
$$\mathbf{C}^{\varepsilon_{R_{xx}}}(\mathbf{p}) = \mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p}) - \mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}},$$

где $\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})$ — проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала стохастической системы; $\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}}$ — проекционная характеристика математического ожидания выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$; $\mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p})$ — проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала стохастической системы; $\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}}$ — проекционная характеристика корреляционной функции выходного сигнала эквивалентной детерминированной системы с параметрами регулятора $\bar{\mathbf{p}}$.

Связь между приближёнными представлениями математических ожиданий и корреляционных функций выходного сигнала и их проекционными характеристиками для базиса размерности l определяется как

$$m_x(t,\mathbf{p}) \approx m_x^l(t,\mathbf{p}) = \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p});$$
$$m_{\bar{x}}(t) \approx m_{\bar{x}}^l(t) = \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}(t)\mathbf{C}^{m_{\bar{x}}};$$
$$R_{xx}(t_1,t_2,\mathbf{p}) \approx R_{xx}^l(t_1,t_2,\mathbf{p}) = \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}(t_1)\mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p})\mathbf{\Phi}(t_2);$$
$$\bar{R}_{xx}(t_1,t_2) \approx \bar{R}_{xx}^l(t_1,t_2) = \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}(t_1)\mathbf{C}^{\bar{R}_{xx}}\mathbf{\Phi}(t_2).$$

При вычислении $\mathbf{C}^{m_x}(\mathbf{p})$ и $\mathbf{C}^{R_{xx}}(\mathbf{p})$ используется усреднённая проекционная модель [5]. Данная модель определяет явную аналитическую зависимость проекционных характеристик математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала стохастической системы от тех же характеристик её входного сигнала, а также от математических ожиданий и дисперсий либо корреляционных функций её случайных параметров, если они являются случайными процессами. В последнем случае случайные коэффициенты модели (1) также будут случайными процессами. Чтобы привести такую модель к виду, подобному (1), т. е. к модели с коэффициентами в виде случайных величин, можно представить эти случайные процессы в виде линейной комбинации независимых случайных величин $\tilde{a}_{is}$, $\tilde{b}_{js}$, являющихся коэффициентами канонического разложения соответствующих случайных процессов по системам неслучайных координатных функций $\Psi_{is}^{\tilde{a}}(t)$, $\Psi_{js}^{\tilde{b}}(t)$:

$$a_i(t) = m_{a_i}(t) + \sum_{s=1}^{r}\tilde{a}_{is}\Psi_{is}^{\tilde{a}}(t),\ i = \overline{0, n-1};$$
$$b_j(t) = m_{b_j}(t) + \sum_{s=1}^{r}\tilde{b}_{js}\Psi_{js}^{\tilde{b}}(t),\ j = \overline{0, m}.$$

Случайные величины $\tilde{a}_{is}$, $\tilde{b}_{js}$ имеют нулевые математические ожидания и дисперсии, равные единице. В работе [5] описан алгоритм вычисления координатных функций, основанный на проекционной аппроксимации корреляционной функции случайного процесса и алгоритме ортогонализации на основе разложения Холецкого. При проекционной аппроксимации такой преобразованной модели потребуется ранее упомянутый матричный оператор умножения, необходимый для проекционной аппроксимации координатных функций $\Psi_{is}^{\tilde{a}}(t)$, $\Psi_{js}^{\tilde{b}}(t)$.

Значения параметров регулятора $\tilde{\mathbf{p}}$, учитывающие фактор случайности параметров системы, определяются в результате минимизации функционала (5), т. е.

$$\tilde{\mathbf{p}} = \arg\min_{\mathbf{p}\in\mathbb{R}} J_2(\mathbf{p}).$$

Минимизация функционала $J_2(\mathbf{p})$ также выполняется методом прямого поиска при тех же ограничениях, что были оговорены для функционала $J_1(\mathbf{p})$, но в качестве вектора начальных значений параметров регулятора (начальной точки поиска) используется вектор $\bar{\mathbf{p}}$, найденный на первом этапе оптимизации, т. е. $\mathbf{p}_0 = \bar{\mathbf{p}}$.

Таким образом, второй этап оптимизации параметров регулятора позволяет минимизировать отклонение поведения системы в статистическом смысле от поведения её детерминированного эквивалента путём соответствующей коррекции значений параметров регулятора, определённых на первом этапе.

Пример оптимизации параметров ПИД-регулятора. Электрогидравлический следящий привод (ЭГСП) как силовой привод в составе систем автоматического управления широко используется в авиа- и ракетостроении, робототехнике, транспортном машиностроении, энергетике и других областях. Для улучшения динамических характеристик в контур управления ЭГСП обычно вводится

ПИД-регулятор. Рассмотрим ЭГСП с ПИД-регулятором, описываемый следующей линеаризованной математической моделью:

$$
\begin{aligned}
&e(t) = k_{\text{ус}}(u_{\text{вх}}(t) - k_{\text{ОС}} y_{\text{ш}}(t));\\
&u(t) = k_{\text{п}} e(t) + k_{\text{и}} \int_0^t e(\tau)d\tau + k_{\text{д}} \frac{de(t)}{dt};\\
&R_{\text{а}} i(t) = u(t);\ k_{M\varphi}\varphi_{\text{я}}(t) = k_{Mi} i(t) - k_{\text{МОС}} x_{\text{з}}(t);\\
&k_{Q_{\text{у}} p_{\text{у}}} p_{\text{у}}(t) = k_{Q_{\text{у}}\varphi}\varphi_{\text{я}}(t) - F_{\text{з}} \frac{dx_{\text{з}}(t)}{dt};\\
&m_{\text{з}} \frac{d^2 x_{\text{з}}(t)}{dt^2} + h_{\text{з}} \frac{dx_{\text{з}}(t)}{dt} + 2C_{\text{гд}} x_{\text{з}}(t) = F_{\text{з}} p_{\text{у}}(t);\\
&\frac{V}{2E}\frac{dp(t)}{dt} + k_{Qp} p(t) = k_{Qx} x_{\text{з}}(t) - F\frac{dy_{\text{ш}}(t)}{dt} - q(t);\\
&T_{\text{КУ}} \frac{dq(t)}{dt} + q(t) = k_{\text{КУ}} \frac{dp(t)}{dt};\\
&M\frac{d^2 y_{\text{ш}}(t)}{dt^2} + h\frac{dy_{\text{ш}}(t)}{dt} + Cy_{\text{ш}}(t) = Fp(t),
\end{aligned}
\tag{6}
$$

где $e(t)$ — напряжение на входе ПИД-регулятора; $u_{\text{вх}}(t)$ — напряжение на суммирующем входе электронного усилителя сигнала ошибки с коэффициентом усиления $k_{\text{ус}}$ (входной сигнал ЭГСП); $y_{\text{ш}}(t)$ — перемещение штока поршня гидроцилиндра (выходной сигнал ЭГСП), которое измеряется датчиком линейного перемещения, формирующим сигнал электрической отрицательной обратной связи с коэффициентом передачи $k_{\text{ОС}}$; $u(t)$ — напряжение на обмотке управления электромеханического преобразователя (ЭМП); $k_{\text{п}}$, $k_{\text{и}}$, $k_{\text{д}}$ — настраиваемые параметры ПИД-регулятора; $R_{\text{а}}$ — активное сопротивление обмотки управления ЭМП; $i(t)$ — ток в обмотке управления ЭМП; $k_{M\varphi}$, k_{Mi} — коэффициенты внешней моментной характеристики ЭМП; $\varphi_{\text{я}}(t)$ — угол поворота якоря ЭМП и закреплённой на нём заслонки; $k_{\text{МОС}}$ — коэффициент механической обратной связи через гибкий стержень; $x_{\text{з}}(t)$ — перемещение золотника электрогидравлического усилителя (ЭГУ); $k_{Q_{\text{у}} p_{\text{у}}}$, $k_{Q_{\text{у}}\varphi}$ — коэффициенты линеаризации расходно-перепадной и регулировочной характеристик управляющего элемента «сопло—заслонка» соответственно; $p_{\text{у}}(t)$ — управляющий перепад давлений на торцах золотника ЭГУ; $F_{\text{з}}$ — площадь торца золотника ЭГУ; $m_{\text{з}}$ — масса золотника ЭГУ; $h_{\text{з}}$ — коэффициент вязкого трения на золотнике ЭГУ; $C_{\text{гд}}$ — коэффициент жёсткости гидродинамической пружины; V — объём полостей гидроцилиндра (ГЦ); E — модуль объёмной упругости рабочей жидкости; $p(t)$ — перепад давлений в полостях ГЦ; k_{Qp}, k_{Qx} — коэффициенты линеаризации расходно-перепадной характеристики золотникового гидрораспределителя соответственно; F — рабочая площадь поршня ГЦ; $q(t)$ — расход перетечки между полостями ГЦ, регулируемый гидромеханическим корректирующим устройством (КУ); $T_{\text{КУ}}$, $k_{\text{КУ}}$ — настраиваемые параметры КУ; M — масса подвижных частей ГЦ и нагрузки ЭГСП; h — коэффициент вязкого трения на поршне и штоке ГЦ; C — коэффициент позиционной нагрузки ГЦ (при расчётах полагаем $C = 0$).

Рассматриваемый ЭГСП является достаточно типичным, и подробное описание его математической модели можно найти, например, в работе [6]. Он имеет высокую удельную мощность в сочетании с быстродействием, но при этом чувствителен к свойствам рабочей жидкости, температуре окружающей среды и другим факторам, носящим в основном случайный характер. Рассмотренный выше алгоритм позволяет минимизировать влияние указанных факторов за счёт дополнительной оптимизации параметров ПИД-регулятора с учётом случайности некоторых физических параметров ЭГСП. Особенностью ЭГСП, описываемого моделью (6), является наличие встроенного гидромеханического корректирующего устройства, обеспечивающего дополнительное демпфирование путём введения скоростной обратной связи по перепаду давлений в полостях гидроцилиндра. Параметры данного КУ наряду с параметрами ПИД-регулятора также нуждаются в оптимизации.

В качестве случайного параметра ЭГСП может рассматриваться практически любой физический параметр (коэффициент) модели (6), кроме тех, которые нуждаются в оптимизации. Все эти параметры, как и большинство параметров подобных физических систем, имеют закон распределения плотности вероятности, близкий к нормальному, что следует из центральной предельной теоремы. В данном примере будем считать случайной величиной коэффициент механической силовой отрицательной обратной связи по положению золотника ЭГУ, обозначенный в модели (6) как $k_{\text{МОС}}$. Эта обратная связь конструктивно реализуется в виде гибкого стального стержня, один конец которого жёстко связан с заслонкой гидрораспределителя типа «сопло—заслонка», а другой — с золотником ЭГУ. Величина $k_{\text{МОС}}$ зависит от геометрии стержня, физических параметров материала и режима его термообработки (закалки). Имеет место разброс значений данного параметра в пределах технологического допуска, поэтому множество ЭГСП (серию изделий) можно рассматривать как множество реализаций одной стохастической системы, описываемой обобщённой моделью (1), а параметр $k_{\text{МОС}}$ — как постоянную случайную величину, от которой

линейно зависят некоторые из коэффициентов модели (1). Как указывалось ранее, данная случайная величина имеет распределение, которое при практических расчётах можно принять нормальным (гауссовым). Тогда математическое ожидание $m_{k_{\text{МОС}}} = 10$ Н соответствует номинальному (наиболее вероятному) значению данного параметра, а дисперсия $D_{k_{\text{МОС}}} = 7,33$ Н^2 характеризует отклонение от номинального значения, которое для параметров ЭГСП может достигать 50 %. В данном примере предполагается, что указанные статистические характеристики известны либо могут быть идентифицированы.

Таким образом, если представить ЭГСП, описываемый моделью (6), в виде типовой системы управления с обратной связью, то объект управления со случайным параметром $k_{\text{МОС}}$ будет включать в себя ЭМП, ЭГУ и ГЦ, а управляющее воздействие, формируемое ПИД-регулятором, находящимся в прямой цепи контура управления, будет прикладываться к входу ЭМП.

Приводя модель (6) к виду (1), получаем дифференциальное уравнение, где $n = 7$, $m = 3$ и пять коэффициентов в левой части ($a_1 ... a_5$) являются случайными величинами, так как зависят от случайного физического параметра $k_{\text{МОС}}$. Данные случайные коэффициенты вследствие линейной зависимости от $k_{\text{МОС}}$ имеют нормальное распределение, а их математические ожидания $m_{a_1} \dots m_{a_5}$ и дисперсии $D_{a_1} \dots D_{a_5}$ выражаются через заданные $m_{k_{\text{МОС}}}$ и $D_{k_{\text{МОС}}}$.

Задача оптимизации параметров формулируется следующим образом. Требуется найти значения параметров ПИД-регулятора ($k_{\text{п}}$, $k_{\text{и}}$, $k_{\text{д}}$) и гидромеханического КУ ($T_{\text{КУ}}$, $k_{\text{КУ}}$), обеспечивающие желаемые динамические характеристики ЭГСП с учётом случайности физического параметра $k_{\text{МОС}}$. Иными словами, требуется минимизировать отклонение математического ожидания $m_{y_{\text{ш}}}(t)$ выходного сигнала ЭГСП, являющегося случайным процессом вследствие случайности параметра $k_{\text{МОС}}$, от детерминированного выходного сигнала $y_{\text{ш}}(t)$, который имеет место при отсутствии случайного разброса значений параметра $k_{\text{МОС}}$. Одновременно требуется минимизировать дисперсию $D_{y_{\text{ш}}}(t)$ выходного сигнала ЭГСП.

Желаемые динамические характеристики ЭГСП задаются функцией эталонного переходного процесса $y^{\text{э}}_{\text{ш}}(t) = 0,1(1 - \text{e}^{-20t})$, м, который должен иметь место при подаче на его вход (суммирующий вход электронного усилителя) детерминированного ступенчатого сигнала $u_{\text{вх}}(t) = 0,01 \cdot 1(t)$, В, при нулевых начальных условиях. В качестве ортогонального базиса $\mathbf{\Phi}(t)$ используется базис функций Уолша с $l = 64$.

На первом этапе алгоритма, описанного выше, искали значения $k_{\text{п}}$, $k_{\text{и}}$, $k_{\text{д}}$ и $T_{\text{КУ}}$, $k_{\text{КУ}}$ без учёта случайности физического параметра $k_{\text{МОС}}$, т. е. полагали, что $k_{\text{МОС}} = m_{k_{\text{МОС}}}$ и модель ЭГСП является детерминированной. Для минимизации функционала (3) использовали метод Нелдера—Мида при начальных значениях $k_{\text{п}} = 1$, $k_{\text{и}} = 0$, $k_{\text{д}} = 0$ и $T_{\text{КУ}} = 0$, $k_{\text{КУ}} = 0$. В качестве ограничения выступало условие устойчивости, определяемое по корням характеристического уравнения. В результате были найдены следующие значения: $k_{\text{п}} = 2,7$, $k_{\text{и}} = 0,0031$, $k_{\text{д}} = 0,0107$ и $T_{\text{КУ}} = 0,04$, $k_{\text{КУ}} = 9 \cdot 10^{-11}$. Переходный процесс при найденных параметрах представлен кривой *1* на рис. 1. Случайность параметра $k_{\text{МОС}}$ приводит к тому, что математическое ожидание переходного процесса отличается от детерминированного переходного процесса (кривая *2* на рис. 1).

На втором этапе искали значения $k_{\text{п}}$, $k_{\text{и}}$, $k_{\text{д}}$ и $T_{\text{КУ}}$, $k_{\text{КУ}}$ с учётом случайности физического

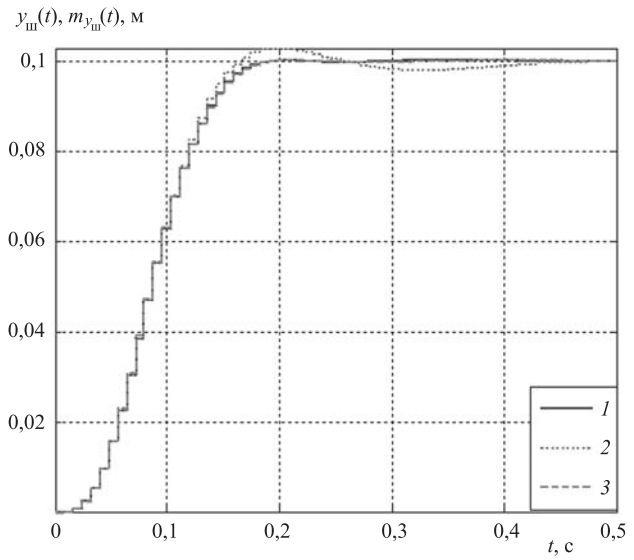


Рис. 1. Выходной сигнал $y_{\text{ш}}(t)$ детерминированной модели ЭГСП и математическое ожидание $m_{y_{\text{ш}}}(t)$ выходного сигнала стохастической модели ЭГСП до и после оптимизации параметров ПИД-регулятора и КУ:

1 — $y_{\text{ш}}(t)$ для детерминированной модели ЭГСП после первого этапа оптимизации параметров; *2* — $m_{y_{\text{ш}}}(t)$ для стохастической модели ЭГСП до дополнительной оптимизации параметров; *3* — $m_{y_{\text{ш}}}(t)$ для стохастической модели ЭГСП после дополнительной оптимизации параметров

параметра $k_{МОС}$, т. е. полагали, что модель ЭГСП является стохастической. Минимизацию функционала (5) также выполняли методом Нелдера—Мида при начальных значениях параметров ПИД-регулятора и КУ, найденных на первом этапе. В результате были найдены следующие значения: $k_п = 2{,}7$, $k_и = 3{,}68 \cdot 10^{-6}$, $k_д = 0{,}007$ и $T_{КУ} = 0{,}0722$, $k_{КУ} = 1{,}01 \cdot 10^{-9}$. Математическое ожидание переходного процесса для этих скорректированных значений параметров ПИД-регулятора и КУ (кривая *3* на рис. 1) мало отличается от детерминированной функции переходного процесса, представленной кривой *1*. Для большей наглядности на рис. 2 представлена разность

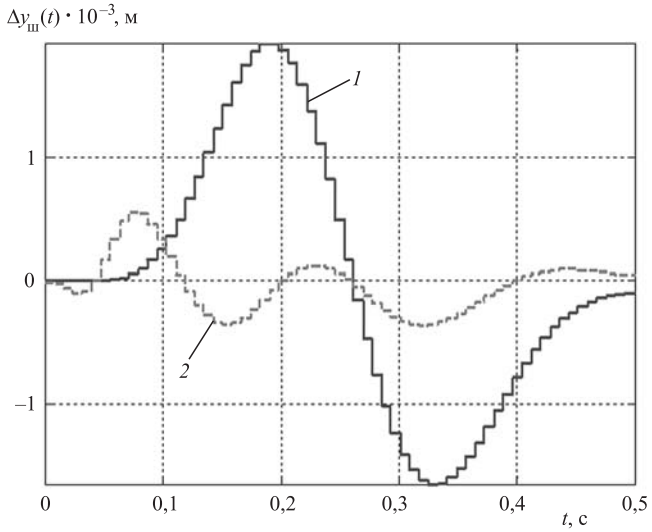


Рис. 2. Разность $\Delta y_ш(t) = m_{y_ш}(t) - y_ш(t)$ до (*1*) и после (*2*) дополнительной оптимизации параметров ПИД-регулятора и КУ

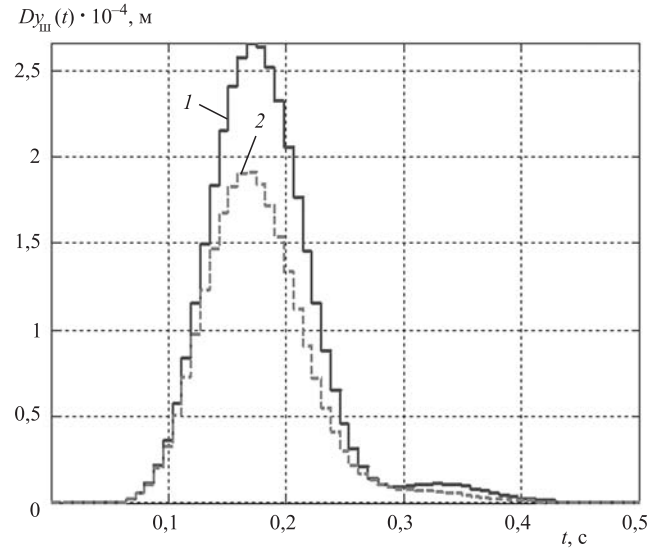


Рис. 3. Дисперсия выходного сигнала стохастической модели ЭГСП до (*1*) и после (*2*) дополнительной оптимизации параметров ПИД-регулятора и КУ

$\Delta y_ш(t) = m_{y_ш}(t) - y_ш(t)$ до (кривая *1*) и после (кривая *2*) второго этапа оптимизации параметров ПИД-регулятора и КУ. Достигаемое при этом уменьшение максимума дисперсии переходного процесса примерно на 30 % демонстрирует кривая *2* в сравнении с кривой *1* на рис. 3.

Для проверки полученных результатов был выполнен вычислительный эксперимент, в ходе которого моделировали поведение системы путём многократного решения системы уравнений (6) методом Рунге—Кутты 4-го порядка для оптимальных значений параметров ПИД-регулятора и КУ, найденных на первом и втором этапах рассматриваемого алгоритма. После численного усреднения 2000 решений системы (6) по множеству реализаций были получены оценки математических ожиданий и дисперсий выходного сигнала ЭГСП, практически не отличающиеся от приведённых на рис. 1...3.

Все вычисления выполняли на персональном компьютере со следующими техническими характеристиками: CPU Intel Core 2 6600, 2.40 GHz, RAM 4 GB. Программа оптимизации выполнялась в системе MATLAB® (The MathWorks Inc.) версии R2007b. Для минимизации функционалов (3) и (5) использовали стандартную функцию fminsearch с параметрами оптимизации, заданными по умолчанию. Время вычислений для первого этапа алгоритма оптимизации составило примерно 10 с, для второго — около 30 с.

Заключение. Эффективный алгоритм оптимизации параметров ПИД-регулятора, обеспечивающий минимизацию влияния случайности значений физических параметров системы управления на статистические характеристики её выходного сигнала, может быть построен на основе использования усреднённой проекционной модели стохастической системы. При этом оптимальные значения параметров регулятора определяются путём минимизации функционала, выражающего меру отличия проекционных характеристик математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала стохастической системы от соответственно проекционных характеристик математического ожидания и корреляционной функции выходного сигнала детерминированной системы. Усреднённая проекционная модель обеспечивает быстрое вычисление данного функционала, что важно при использовании методов прямого поиска его минимума. Дополнительным преимуществом использования данной модели является

возможность сокращения времени расчётов благодаря распараллеливанию операций [5].

На примере оптимизации параметров ПИД-регулятора ЭГСП с одним случайным физическим параметром показано, что таким способом можно улучшить точность его работы. В этом же примере показана возможность одновременной оптимизации параметров встроенного гидромеханического корректирующего устройства, что в общем случае соответствует возможности оптимизации не только параметров ПИД-регулятора, но и параметров других элементов системы управления.

Предлагаемый подход к уменьшению влияния случайности физических параметров систем управления на точность и качество их работы представляется простым и экономичным, так как не требует добавления в систему новых элементов и тем самым позволяет избежать усложнения и, соответственно, удорожания технического решения данной проблемы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Калужской области (проект № 16-41-400701).

Библиографические ссылки

1. **Александров А.Г., Паленов М.В.** Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов в технических системах // Автоматика и телемеханика. 2014. № 2. С. 16—30.

2. **Ремизова О.А., Сыроквашин В.В., Фокин А.Л.** Синтез робастных систем управления с типовыми регуляторами // Известия вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 12. С. 966—971.

3. **Лапин С.В., Егупов Н.Д.** Теория матричных операторов и её приложение к задачам автоматического управления. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 496 с.

4. **Методы** инженерного синтеза сложных систем управления: аналитический аппарат, алгоритмы приложения в технике. В 2 ч. / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.

5. **Теория** и компьютерные методы исследования стохастических систем / К.А. Пупков, Н.Д. Егупов, А.М. Макаренков, А.И. Трофимов. М.: Физматлит, 2003. 400 с.

6. **Попов Д.Н.** Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1977. 424 с.

Ссылка для цитирования

Макаренков А.М., Тин Эй Чжо, Аунг Чжо Со. Оптимизация параметров ПИД-регулятора с учётом случайности параметров объекта управления // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 2. С. 80—87.

УДК 532.5

Г.Я. Хусаинова, канд. физ.-мат. наук, доц., **И.Г. Хусаинов,** д-р физ.-мат. наук, доц.
(Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета)

gkama@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ АНОМАЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Рассмотрена фильтрация неньютоновской жидкости в двухзонной пористой среде. Построена математическая модель колебательного движения аномальной жидкости в неоднородной пористой среде, представляющей собой две кольцеобразные зоны с различающимися коллекторскими свойствами. Показано влияние начального градиента давления на поля давления и температуры в пласте. Проведён вычислительный эксперимент, построены графики зависимости температуры пласта от его радиальной координаты.

Ключевые слова: фильтрация; жидкость; давление; проницаемость; вязкость; пласт; скважина.

The filtration of a non-Newtonian fluid in a two-area porous medium is considered. A mathematical model of the oscillatory motion of an anomalous fluid in an inhomogeneous porous medium, which is two annular areas with different collector properties, is constructed. The effect of the initial pressure gradient on the pressure and temperature fields in the layer is shown. A computational experiment is carried out. The dependence of the layer temperature from its radial coordinate is plotted.

Keywords: filtration; liquid; pressure; permeability; viscosity; layer; hole.

Введение. В процессе долгой эксплуатации нефтяных скважин на стенки пор в призабойной зоне пласта оседают парафин, соли и твёрдые частицы. Это снижает проницаемость призабойной зоны пласта. Для её восстановления применяют тепловые и другие методы.

При тепловом методе повышение температуры пористой среды осуществляется обычными нагревателями, потоком электромагнитной энергии, внутрипластовым горением и т. п. С увеличением температуры призабойной зоны пласта уменьшается вязкость нефти, происходит плавление парафина, осевшего на стенки пор этой зоны, и, соответственно, усиливается фильтрационное свойство порового пространства пласта.

В работах [1—5] обсуждается возможность повышения температуры призабойной зоны за счёт колебательного движения жидкости. Такой способ нагрева обладает следующим преимуществом: максимальное тепловыделение происходит в зонах с низкой проницаемостью, например в зонах, закупоренных отложениями парафина или газогидратов.

В работе [6] рассмотрена передача тепловой энергии за счёт поля давления. Отмечено, что в этом случае в качестве полезного термодинамического эффекта выступает баротермический эффект. В работе [7] уточнено уравнение энергии для случая фильтрации аномальной жидкости в пористой среде.

В данной работе рассмотрено влияние наличия начального градиента давления при фильтрации аномальной жидкости на поля давления и температуры в неоднородной пористой среде, представляющей собой две кольцеобразные зоны с различающимися коллекторскими свойствами.

Вывод формулы для вычисления температуры пласта. Пусть имеется пласт, состоящий из двух кольцеобразных зон с различающимися коллекторскими свойствами — проницаемостью и пористостью: соответственно k_1 и m_1 в первой зоне ($r_0 < r \leqslant R_1$) и k_2 и m_2 во второй зоне ($R_1 < r \leqslant R_2$). Здесь r_0 — радиус скважины; R_1 и R_2 — радиусы первой и второй зон. Граница каждой зоны имеет форму боковой поверхности цилиндра, соосного скважине (рис. 1). Пласт насыщен неньютоновской жидкостью.

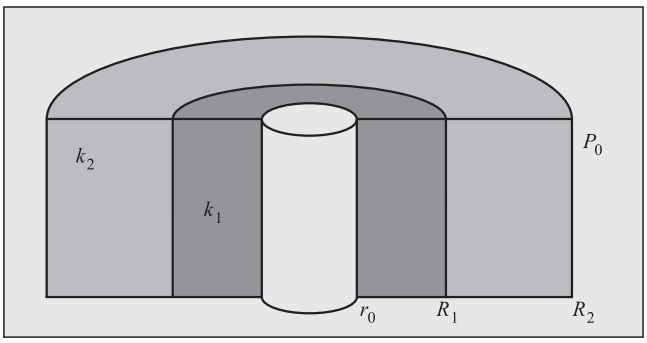


Рис. 1. Геометрия задачи

В начальный момент времени на забое скважины скорость движения жидкости начинает изменяться по периодическому закону:

$$\upsilon_{|r=r_0} = \upsilon_0 \cos \omega t, \tag{1}$$

где υ_0 — амплитуда скорости фильтрации жидкости; t — время; ω — круговая частота колебания.

На границе между зонами выполняется условие непрерывности потока жидкости

$$\upsilon_{1|r=R_1} = \upsilon_{2|r=R_1}, \tag{2}$$

где υ_1, υ_2 — скорости фильтрации в первой и во второй зонах соответственно.

Уравнение состояния жидкости, насыщающей пористую среду, в общем случае имеет вид

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha(P - P_0) - \beta(T - T_0)), \tag{3}$$

где ρ_0 — плотность жидкости в начальный момент времени; P — давление жидкости; P_0 — давление жидкости в начальный момент времени; α, β — коэффициенты, зависящие от свойств скелета пласта и жидкости; T — температура пласта; T_0 — начальная температура пласта.

Уравнения движения для вязкопластичной жидкости в первой и во второй зонах имеют вид

$$\upsilon_1 = -\frac{k_1}{\mu}\left(\frac{\partial P_1}{\partial r} - G_0 \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial P_1}{\partial r}\right)\right);$$
$$\left|\frac{\partial P_1}{\partial r}\right| > G_0; r_0 < r \leqslant R_1, \tag{4}$$

$$\upsilon_2 = -\frac{k_2}{\mu}\left(\frac{\partial P_2}{\partial r} - G_0 \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial P_2}{\partial r}\right)\right);$$
$$\left|\frac{\partial P_2}{\partial r}\right| > G_0;\ R_1 < r \leqslant R_2, \tag{5}$$

где μ — вязкость жидкости; G_0 — начальный (предельный) градиент давления.

Распределения давлений при фильтрации аномальной жидкости в зонах описываются уравнениями [7]

$$\frac{\partial P_1}{\partial t} = \chi_1 \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left(\frac{\partial P_1}{\partial r} - G_0 \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial P_1}{\partial r}\right)\right)\right);$$
$$r_0 < r \leqslant R_1, \tag{6}$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial t} = \chi_2 \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\left(\frac{\partial P_2}{\partial r} - G_0 \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial P_2}{\partial r}\right)\right)\right);$$
$$R_1 < r \leqslant R_2, \tag{7}$$

где $\chi_i = \dfrac{k_i \rho_0 C_l^2}{\mu m_i}$ — коэффициент пьезопроводности в i-й зоне, $i = 1, 2$; C_l — скорость распространения звука в жидкости.

Начальные и граничные условия могут быть записаны в виде

$$P_{1|t=0} = P_{2|t=0} = P_0, \tag{8}$$

$$P_{2|r=R_2} = P_0, \tag{9}$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial r}\Big|_{r=r_0} = -\frac{\mu}{k_1} A\omega \cos\omega t - G_0 \operatorname{sgn}(\cos\omega t). \tag{10}$$

На границе между зонами выполняется условие непрерывности давления

$$P_{1|r=R_1} = P_{2|r=R_1}. \tag{11}$$

При фильтрации аномальной жидкости уравнения энергии для зон имеют вид [7]

$$c_{p1}\frac{\partial T_1}{\partial t} + c_l \upsilon_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial r} + \varepsilon \frac{\partial P_1}{\partial r} - \eta G_0 \frac{\dfrac{\partial P_1}{\partial r}}{\left|\dfrac{\partial P_1}{\partial r}\right|} \right) =$$

$$= \lambda_1 \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right); \; r_0 < r \leqslant R_1, \tag{12}$$

$$c_{p2}\frac{\partial T_2}{\partial t} + c_l \upsilon_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial r} + \varepsilon \frac{\partial P_2}{\partial r} - \eta G_0 \frac{\dfrac{\partial P_2}{\partial r}}{\left|\dfrac{\partial P_2}{\partial r}\right|} \right) =$$

$$= \lambda_2 \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right); \; R_1 < r \leqslant R_2, \tag{13}$$

где T_1, T_2 — температуры в первой и второй зонах соответственно; c_l — теплоёмкость жидкости; η — коэффициент адиабатического охлаждения; ε — коэффициент Джоуля—Томсона; λ_i, c_{pi} — коэффициенты теплопроводности и теплоёмкости пористой среды i-й зоны, $i = 1, 2$.

В начальный момент времени в пористой среде температура однородна и равна T_0:

$$T_{1|t=0} = T_{2|t=0} = T_0. \tag{14}$$

На границе между зонами выполняется условие непрерывности температуры и потока тепла

$$T_{1|r=R_1} = T_{2|r=R_2}; \; \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r}\Big|_{r=R_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}\Big|_{r=R_1}, \tag{15}$$

а на правой границе среды температура постоянна и равна начальному значению:

$$T_{2|r=R_2} = T_0. \tag{16}$$

Учитывая рассматриваемые в работе давление и температуру, уравнение состояния можно линеаризовать. Так как согласно [8] параметры $\alpha \approx 10^{-9}$ Па$^{-1}$ и $\beta \approx 1/273$ К$^{-1}$, а в данной работе давление и температура изменяются в следующих пределах: $P - P_0 \approx$ ≈ 10 МПа, $T - T_0 \approx 0{,}3$ К, то получим

$$\alpha(P - P_0) = 1; \; \beta(T - T_0) = 1.$$

Таким образом, уравнение состояния (3) можно записать в виде

$$\rho = \rho_0. \tag{17}$$

Из уравнения неразрывности (17) для несжимаемой жидкости с учётом аксиальной симметрии определим скорость движения жидкости в пласте:

$$\upsilon = \frac{A\omega r_0}{r}\cos\omega t, \tag{18}$$

где A — амплитуда колебания ($A\omega = \upsilon_0$).

При медленно изменяющихся полях давления, когда выполняется условие $\omega < \chi_i / R_i^2$, в уравнениях (6) и (7) можно пренебречь производными по времени. Тогда, решая систему уравнений (6) и (7) с граничными условиями (9)...(11), получим формулы для описания распределения давления в каждой зоне

$$P_1(r,t) = \frac{\mu}{k_1} A\omega r_0 \cos\omega t \ln\frac{R_1}{r} + \frac{\mu}{k_2} A\omega r_0 \times$$

$$\times \cos\omega t \ln\frac{R_2}{R_1} + P_0 + G_0 \operatorname{sgn}(\cos\omega t)(R_2 - r), \tag{19}$$

$$P_2(r,t) = -\frac{\mu}{k_2} A\omega r_0 \cos\omega t \ln\frac{r}{R_2} +$$

$$+ G_0 \operatorname{sgn}(\cos\omega t)(R_2 - r) + P_0. \tag{20}$$

На практике изменение температуры пористой среды, насыщенной жидкостью, за счёт конвективного переноса тепла больше, чем при переносе теплопроводностью. Количественная оценка показывает [9], что

$$\frac{\left|\lambda \dfrac{1}{r}\dfrac{\partial}{\partial r}\left(r \dfrac{\partial T}{\partial r} \right)\right|}{\left|c_l \upsilon \dfrac{\partial T}{\partial r}\right|} \approx \frac{\lambda \Delta T / L^2}{c_l \upsilon \Delta T / L} = \frac{\lambda}{c_l \upsilon L} = 1,$$

где L — характерная длина, на которой температура изменяется на величину ΔT; для жидкости в пластовых условиях c_l = 500 Ккал/(К·м^3); $\upsilon = 6\cdot10^{-7}$ м/с; L = 50 м; $\lambda \approx 10^{-4}$ Ккал/(К·м·с); $\lambda/c_l\upsilon L \approx 0{,}01$.

Таким образом, расчёты показывают, что создаваемые потоки жидкости позволяют пренебрегать вкладом теплопроводности. Тогда уравнения (12) и (13) будут иметь вид

$$c_{p1}\frac{\partial T_1}{\partial t} + c_l\upsilon_1\left(\frac{\partial T_1}{\partial r} + \varepsilon\frac{\partial P_1}{\partial r} - \eta G_0\,\mathrm{sgn}(\cos\omega t)\right) = 0;\quad r_0 < r \leqslant R_1, \tag{21}$$

$$c_{p2}\frac{\partial T_2}{\partial t} + c_l\upsilon_2\left(\frac{\partial T_2}{\partial r} + \varepsilon\frac{\partial P_2}{\partial r} - \eta G_0\,\mathrm{sgn}(\cos\omega t)\right) = 0;\quad R_1 < r \leqslant R_2. \tag{22}$$

Уравнения (21), (22) решаются методом характеристик. Характеристики для этих уравнений представляются в виде

$$\frac{dr}{dt} = \frac{c_l}{c_{pi}}\upsilon;\quad r(0) = r_i,$$

где r_i — характерное значение координаты для i-й зоны.

Окончательное решение получается путём подстановки (18)...(20) в (21) и (22) и последующего интегрирования с учётом начального условия

$$T_1 = T_0 + \varepsilon(P_1(r,t) - P_1(r_1,0)) + \int_0^t\left[\varepsilon\frac{\partial P_1(r,\tau)}{\partial\tau} - \frac{c_l}{c_{p1}}\upsilon_1(r,\tau)\eta G_0\,\mathrm{sgn}(\cos\omega\tau)\right]d\tau;$$

$$T_2 = T_0 + \varepsilon(P_2(r,t) - P_2(r_2,0)) + \int_0^t\left[\varepsilon\frac{\partial P_2(r,\tau)}{\partial\tau} - \frac{c_l}{c_{p2}}\upsilon_2(r,\tau)\eta G_0\,\mathrm{sgn}(\cos\omega\tau)\right]d\tau.$$

Численные расчёты. На рис. 2 приведены результаты расчётов зависимости температуры пласта от радиальной координаты с учётом баротермического эффекта в аномальной и обычной жидкостях. Кривые *1*, *3* и *2*, *4* соответствуют значениям предельного градиента сдвига $G_0 = 0{,}95\cdot10^5$ Па/м и $G_0 = 0$ за время t, равное 5 и 10 мин.

Расчёты проводили при следующих значениях параметров пласта, скважины и жидкости: r_0 = 0,2 м; $\varepsilon = 4{,}7\cdot10^{-7}$ К/Па; $\eta = 0{,}5\cdot10^{-7}$ К/Па; c_l = 500 Ккал/(К·м^3); μ = 0,01 Па·с; A = 0,1 м; ω = 0,01 с$^{-1}$.

Исследование двухзонного пласта. Первая зона с проницаемостью $k_1 = 4\cdot10^{-13}$ м^2 и пористостью m_1 = 0,1 локализована в интервале от r_0 = 0,2 м (радиус скважины) до 0,4 м. Вторая зона с проницаемостью $k_2 = 4\cdot10^{-12}$ м^2 и пористостью m_2 = 0,15 расположена в интервале пласта от 0,4 до 1 м.

На рис. 2 видно, что баротермический эффект с увеличением расстояния от скважины уменьшается. Сравнение кривых *1* и *3*, *2* и *4* показывает, что с увеличением времени фильтрации нефти температура пласта увеличивается. Из расчётов следует, что вклад начального градиента давления проявляется в увеличении баротермического эффекта (сравнение кривых *1* и *2*, *3* и *4*, соответствующих аномальной и обычной жидкостям).

Следует отметить, что вблизи границы между двумя зонами (r = 0,4 м) формируется переходная зона III с иными закономерностями пространственно-временных изменений температуры. Эта зона локализована в интервале пласта 0,37...0,42 м. С увеличением времени переходная зона расширяется. На рис. 2 также видно, что граница раздела проницаемостей оказывает существенное влияние на поле температуры, так как в переходной зоне

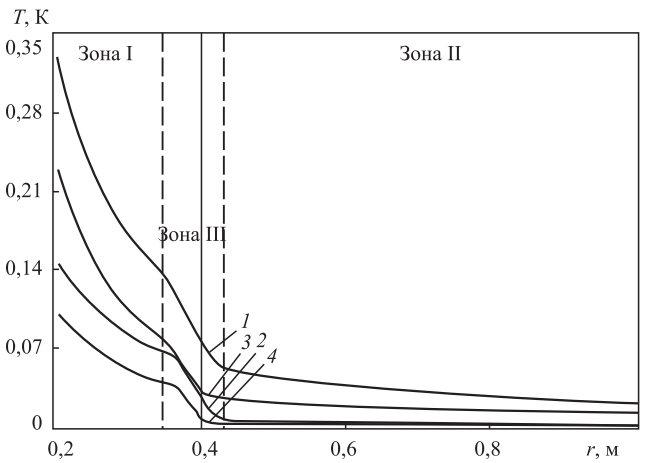


Рис. 2. Зависимость температуры пласта от радиальной координаты при разных значениях начального градиента давления:

1 — $G_0 = 0{,}95\cdot10^5$ Па/м, t = 10 мин; *2* — G_0 = 0, t = 10 мин; *3* — $G_0 = 0{,}95\cdot10^5$ Па/м, t = 5 мин; *4* — G_0 = 0, t = 5 мин

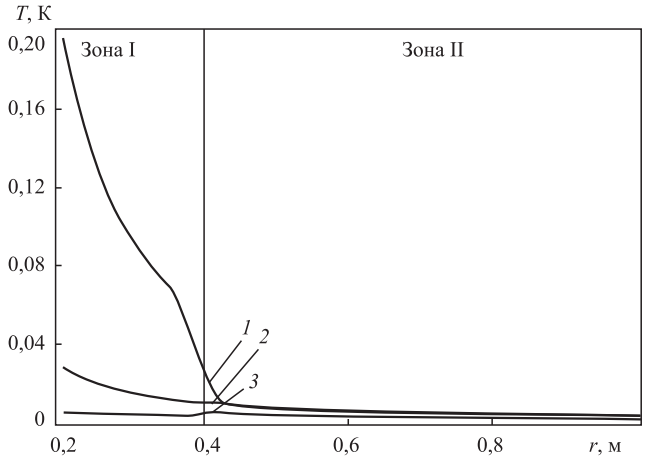


Рис. 3. Зависимость температуры пласта от радиальной координаты при разных значениях проницаемости зон: *1* — первая зона низкопроницаемая, а вторая — высокопроницаемая; *2* — проницаемости первой и второй зон одинаковы; *3* — первая зона высокопроницаемая, а вторая — низкопроницаемая

градиент температуры больше, чем в граничных областях обеих зон. Отметим также, что скорость движения левой границы переходной зоны больше, чем правой. При переходе из высокопроницаемой зоны в низкопроницаемую происходит максимальное выделение тепла. Этот факт доказывает рис. 3, где на кривой *3* отмечается повышение температуры в переходной зоне в сравнении с зонами I и II. Температурный эффект в низкопроницаемой зоне выше, чем в высокопроницаемой зоне.

Заключение. Получено аналитическое решение задачи о температурном поле при одномерно-линейном гармоническом движении аномальной жидкости. Исследован вклад начального градиента сдвига в поле баротермического эффекта в периодическом поле давления в аномальных жидкостях. Установлено, что в колебательном поле давления в аномальной жидкости баротермический эффект выше, чем в обычных жидкостях.

Библиографические ссылки

1. **Шагапов В.Ш., Хусаинова Г.Я., Хусаинов И.Г., Хафизов Р.М.** Релаксация давления в полости, окружённой пористой и проницаемой горной породой // Физика горения и взрыва. 2002. Т. 38. № 3. С. 106—112.

2. **Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Хафизов Р.М**. Релаксация давления в полости, окружённой пористой и проницаемой породой, при её опрессовке введением газа // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 1. С. 109—118.

3. **Хафизов Р.М., Хусаинов И.Г., Шагапов В.Ш.** Динамика восстановления давления в «вакуумированной» скважине // Прикладная математика и механика. 2009. Т. 73. № 4. С. 615—621.

4. **Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я.** Исследование параметров пласта методом опрессовки // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3. URL: http://www.science-education.ru/117-13813 (дата обращения: 04.07.2014).

5. **Хусаинов И.Г.** Динамика релаксации давления в полости с плоскопараллельными стенками после её опрессовки // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 5. URL: http://www.science-education.ru/119-15159 (дата обращения: 31.10.2014).

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

7. **Алишаев М.Г.** О стационарной фильтрации с начальным градиентом // Теория и практика добычи нефти: ежегодник. М.: Недра, 1968. С. 202—211.

8. **Енохович А.С**. Краткий справочник по физике. М.: Высш. шк., 1976. 288 с.

9. **Хусаинова Г.Я.** Исследование температурных полей при фильтрации аномальных жидкостей: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Уфа, 1998. 14 с.

Ссылка для цитирования

Хусаинова Г.Я., Хусаинов И.Г. Моделирование колебательного движения аномальной жидкости в неоднородной пористой среде // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 2. С. 87—91.

Вниманию авторов!

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

УДК 681.267.3

А.Н. Давиденко, П.Н. Давиденко, Н.А. Лапшин
(Армавирский государственный педагогический университет)
andavidenko@mail.ru

МЕТОДИКА РАСЧЁТА МОДУЛЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ВЕСОВ

Использование большегрузных автомобилей с различным числом осей для перевозки различных грузов обусловливает актуальность разработки методики расчёта грузоприёмных платформ, состоящих из различного числа модулей, для низкопрофильных весов. Рассмотрена методика расчёта модуля автомобильных весов. Для расчёта грузоприёмной платформы использована модель условного автомобиля с различными значениями осевых нагрузок.

Ключевые слова: поверка; автомобильные весы; грузоприёмное устройство; наибольший предел взвешивания; осевая нагрузка; допустимое напряжение; момент сопротивления; условный автомобиль.

The use of heavy-duty vehicles with a different number of axles for the transportation of various goods contributes to development actuality of the methods for calculating cargo-receiving platforms, consisting of a different number of modules, for low-profile weighting machines. The method of calculating the module of weighing machine for heavy-duty vehicles is considered. For the calculation of the cargo-receiving platform, a model of a conditional car with different axial loads is used.

Keywords: verification; car weighting machine; cargo intake facility; greatest limit of weighing; axial load; allowable stress; moment of resistance; conditional car.

Введение. Применение короткобазных большегрузных автомобилей с различным числом осей для перевозки различных грузов, которые необходимо взвешивать, обусловливает актуальность разработки методики расчёта грузоприёмной платформы для весов, состоящих из различного числа модулей.

Широко известна методика расчёта грузоприёмного устройства стационарных автомобильных весов. Она содержит требования к жёсткости платформы, в частности к относительному прогибу балки: $\frac{f}{L} \leqslant \frac{1}{1000}$ (f — прогиб; L — расстояние между опорами) и прочности балки:

$$\sigma_{x\,\max} \leqslant [\sigma] = 120 \text{ МПа}, \qquad (1)$$

где $\sigma_{x\,\max}$ — максимальное напряжение, возникающее в сечении балки; $[\sigma]$ — допускаемое напряжение.

Расчёт балок при действии различных нагрузок рассмотрен достаточно подробно в работах [1, 2]. Использование различных грузоприёмных платформ низкопрофильных весов, изготовленных из различных профилей: двутавров, швеллеров и листового проката, делает важной задачу расчёта модуля таких весов.

Стандартным подходом при расчёте грузоприёмной платформы было и остаётся использование модели расчёта, состоящей из двух несущих балок, при задании осевых нагрузок от автомобиля. Предлагаемая методика предусматривает проведение расчёта значения момента сопротивления сечения балки при изгибе W_x, для выбора профиля проката, при известных максимальном изгибающем моменте $M_{x\,\max}$ и допускаемом напряжении материала балки $[\sigma]$ по формуле [1]

$$W_x \geqslant \frac{M_{x\,\max}}{[\sigma]}. \qquad (2)$$

Рациональная конструкция грузоприёмной платформы конкретного модуля должна иметь такой момент сопротивления сечения выбранного проката, при котором отклонение максимального напряжения от допускаемого [1, 2]

$$\delta_\sigma = \frac{\sigma_{x\,\max} - [\sigma]}{[\sigma]} \cdot 100\ \% \qquad (3)$$

удовлетворяет условию $\delta_\sigma < 0$ — при недогрузе; $\delta_\sigma > 0$ — при перегрузе, причём разница между $\sigma_{x\,\max}$ и $[\sigma]$ составляет не более ±5 %.

Высота грузоприёмной платформы модуля низкопрофильных весов составляет 200...400 мм. Рассчитанное значение момента сопротивления сечения балки должно быть равным моменту сопротивления составного сечения низкопрофильных платформенных весов W_Σ:

$$W_x = W_\Sigma. \quad (4)$$

Кроме того, особенностью данной методики является обеспечение жёсткости платформы использованием относительного прогиба балки $\frac{f}{L} \leqslant \frac{1}{600}$ и коэффициента динамического перегруза $k_д = 1{,}2$. Требование поверки модуля грузоприёмной платформы грузом с массой, равной 80 % от наибольшего предела взвешивания (НПВ) весов [3, 4], накладывает жёсткие условия при определении наибольшего предела взвешивания модуля (НПМ) — допустимой нагрузки на модуль и его расчётного значения ($НПМ_р$) — предельно допустимой нагрузки на модуль.

Широкое использование большегрузных короткобазных автомобилей обусловливает требование к НПМ: НПМ = НПВ. Расчётное значение $НПМ_р$ со стороны одно-, двух- и трёхосных мостов автомобиля определяется с учётом коэффициента $k_д = 1{,}2$.

При выборе НПМ необходимо руководствоваться реальными осевыми нагрузками автомобиля и исходя из этого определять НПВ для условного автомобиля, что позволит рассчитать экономически целесообразную стоимость весов и $НПМ_р$.

Следует отметить необходимость учёта статического перегруза от несимметричного наезда автомобиля на платформу относительно её продольной оси (балки).

Расчёт модуля платформы весов проводится методом условной прокатки автомобиля. Максимальный изгибающий момент в балке возникает при определённом положении осевых нагрузок: от задней оси, моста (тележки) автомобиля и передней оси.

Для вычисления максимального изгибающего момента при использовании метода условной прокатки автомобиля необходимо произвести расчёт $M_{x\,\max}$: от нагрузок передней и задних осей; от нагрузок только задних осей, т. е. когда передняя ось автомобиля находится вне модуля платформы, на другом модуле платформы.

Для двухосных (4 × 2), трёхосных (6 × 4), четырёхосных (8 × 6) автомобилей, для которых справедливо соотношение $b/L \geqslant 0{,}6$, b — расстояние между равнодействующей осевых нагрузок заднего моста и передней осью автомобиля; L — расстояние между опорами (датчиками), при расчёте $M_{x\max}$ от нагрузок задних осей необходимо учитывать их положение на платформе модуля.

Не менее актуальным является расчёт длины и ширины грузоприёмной платформы. Рассмотрим широко используемые типы автомобилей с различными базовыми расстояниями Б и межосевыми расстояниями МТ: Б = 3,5...5,6 м для двухосных (4 × 2) автомобилей; Б = 1,5...3,5 м, МТ = 1,25...1,4 м для трёхосных (6 × 4) автомобилей (рис. 1); Б = 2,2...2,8 м МТ = 1,4 м для четырёхосных (8 × 6) автомобилей.

Оптимальная длина модуля весов будет составлять 6 м, ширина модуля весов, соответственно, 3 м.

Наибольший интерес представляет определение параметров модуля весов для трёхосного (6 × 4) автомобиля. Определим параметры грузоприёмной платформы для автомобильных весов с НПВ, равным 40 тс, длиной 12 м и шириной 3 м. Используем два модуля со следующими размерами: длина 6 м, ширина 3 м.

Так, для расчёта $НПМ_р$ используем модель автомобиля типа МАЗ-MAN 651268 трёхосный (6 × 4), Б = 3,3 м, МТ = 1,4 м, полная масса которого составляет 35 т, и соответствующие параметры осевых нагрузок условного автомобиля для НПМ = НПВ = = 40 тс (рис. 2).

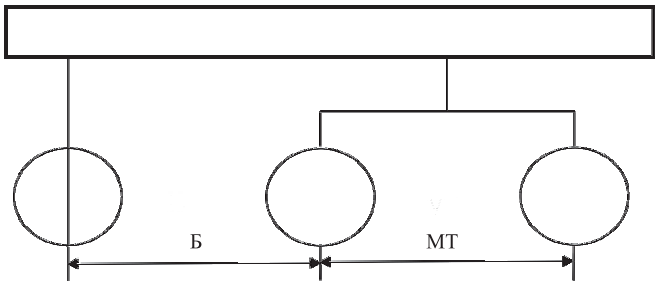


Рис. 1. Модель трехосного автомобиля 6 × 4

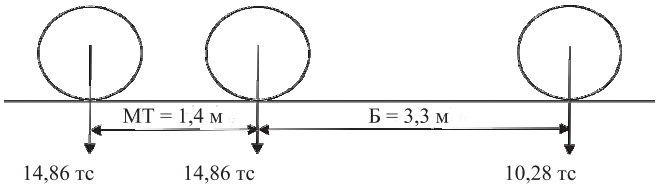


Рис. 2. Модель нагрузки осей условного автомобиля

С учётом коэффициента динамической перегрузки $k_д$ = 1,2 имеем нагрузки условного автомобиля: на переднюю ось 12,34 тс и задние мосты 35,66 тс.

В результате использования данного подхода определяются нагрузки на модуль весов от условного автомобиля с учётом нагрузок от задних осей. Таким образом, исходными данными для расчёта балки платформы весов будут длина модуля 6 м, ширина 3 м. Относительный прогиб платформы 1/600, допускаемое напряжение [σ] = = 150 МПа, допускаемое касательное напряжение [τ] = 87 МПа для стали Ст3сп5 [5]. Максимальная нагрузка продольных балок модуля будет при смещённом наезде автомобиля от колёс задней оси (рис. 3).

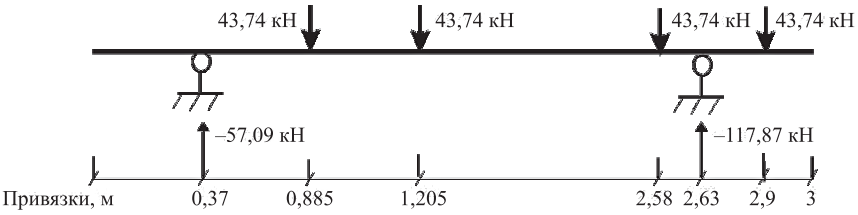


Рис. 3. Расчётная схема определения максимальной нагрузки продольной балки модуля при смещённом наезде условного автомобиля

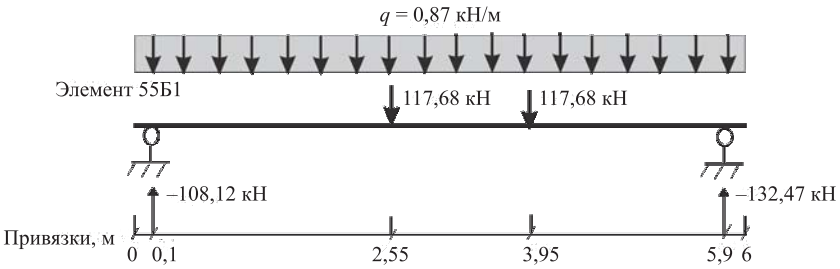


Рис. 4. Расчётная схема балки при нагрузке от задних осей условного автомобиля

Максимальная нагрузка продольной балки при смещённом наезде F = 117,68 кН = 12 тс; НПМ$_р$ = 48 тс.

Максимальный изгибающий момент (рис. 4)

$$M_{x\max} = \frac{F}{8L}(2L-d)^2 = \frac{117,68}{8\cdot 5,8}(2\cdot 5,8-1,4)^2 = 263,87 \text{ кН}\cdot\text{м}, \quad (5)$$

где L — расстояние между опорами; d — расстояние между осевыми нагрузками заднего моста условного автомобиля; F — максимальная осевая нагрузка продольной балки.

Момент сопротивления сечения (2)

$$W_x = \frac{M_{x\max}}{[\sigma]} = \frac{263,87 \text{ кН}\cdot\text{м}}{150 \text{ МПа}} = 1794 \text{ см}^3. \quad (6)$$

По таблице сортамента подбираем двутавр № 55Б1 или № 50Б2 [6]:

$$\frac{W_x - W_{55Б1}}{W_{55Б1}}\cdot 100\ \% = \frac{1794-2051}{2051}\cdot 100\ \% = -12,5\ \%; \quad (7)$$

$$\frac{W_x - W_{50Б2}}{W_{50Б2}}\cdot 100\ \% = \frac{1794-1709}{1709}\cdot 100\ \% = 5\ \%; \quad (8)$$

$$W_{55Б1} = 2051 \text{ см}^3;\ W_{50Б2} = 1709 \text{ см}^3,$$

которые удовлетворяют условиям прочности.

Жёсткость модуля платформы характеризуется значением относительного прогиба под нагрузкой. Так, для двутавра № 50Б2 прогиб составляет 10,12 мм $\left(\frac{f}{L} \leqslant \frac{1}{573}\right)$, а для двутавра № 55Б1 прогиб равен 7,71 мм $\left(\frac{f}{L} \leqslant \frac{1}{755}\right)$. Для соблюдения условий жёсткости $\frac{f}{L} \leqslant \frac{1}{600}$ и прочности выбираем двутавр № 55Б1.

Проверка устойчивости платформы выполняется следующим образом. На конец балки помещается задняя ось автомобиля. Уравновешивающий момент $M_у$ от веса балки должен быть на 5 % больше момента $M_о$ опрокидывания нагрузки задней оси. Эти моменты определяются следующим образом:

$$M_о = Fl_1 + \frac{ql_1^2}{2} = \left(117,68\cdot 0,1 + 0,87\cdot\frac{0,1^2}{2}\right) = 11,77 \text{ кН}\cdot\text{м}, \quad (9)$$

$$M_у = \frac{ql^2}{2} = \frac{0,87\cdot 5,9^2}{2} = 30,28 \text{ кН}\cdot\text{м}, \quad (10)$$

где F — нагрузка задней оси; l_1 — длина консоли модуля платформы; l — расстояние от опоры до края платформы; q — интенсивность нагрузки от веса балки.

В соответствии с полученным значением момента сопротивления сечения W_x = 1794 см^3 для условного автомобиля проводится расчёт момента сопротивления составного сечения

W_Σ. Затем выбирается прокат профилей, соответствующих W_Σ низкопрофильных весов, состоящих из различного числа двутавров, швеллеров и листового проката. При этом полученный момент сопротивления составного сечения конкретных профилей должен удовлетворять условиям прочности, жёсткости и устойчивости.

Заключение. При проверке прочности, жёсткости и устойчивости получены следующие результаты. Напряжения в балке: нормальное $\sigma_{55Б1}$ = 131,2 МПа < [σ] = 150 МПа; касательное $\tau_{55Б1}$ = 28,7 МПа < [τ] = 87 МПа. Относительный прогиб для балки 55Б1 составляет $\frac{1}{755} < \frac{1}{600}$. Момент опрокидывания $M_о$ = 11,77 кН·м; момент уравновешивания $M_у$ = 30,28 кН·м, т. е. выполняется условие $M_у > M_о$.

Использование предложенной методики расчёта модуля автомобильных весов с учётом её особенностей является перспективным. Она позволяет оптимизировать технические параметры весов с учётом прочности в зависимости от нормального и касательного напряжений, жёсткости, устойчивости платформы и осевых нагрузок от автомобилей.

Библиографические ссылки

1. **Гонтарь И.Н., Волчихина Н.И.** Сопротивление материалов: учеб. пособие. Пенза, Пенз. гос. университет, 2008. 263 с.

2. **Водопьянов В.И., Савкин А.Н., Кондратьев О.В.** Курс сопротивления материалов с примерами и задачами: учеб. пособие. Волгоград, ВолгГТУ, 2012. 136 с.

3. **ГОСТ OIML R 76-1—2011.** Государственная система обеспечения единства измерений. Весы неавтоматического действия. Ч. 1. Метрологические и технические требования. Испытания. М.: Стандартинфом, 2013. 131 с.

4. **Davidenk A.N., Davidenk P.N.** Calibration of the Weight Measuring Systems by Means of a Strain-Gage Model // Research J. of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 1. P. 1106—1108.

5. **ГОСТ 535—2005.** Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия. М.: Стандартинфом, 2005. 11 с.

6. **ГОСТ 26020—83.** Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент. М.: Стандартинфом, 1983. 6 с.

Ссылка для цитирования

Давиденко А.Н., Давиденко П.Н., Лапшин Н.А. Методика расчёта модуля автомобильных весов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 1. С. 92—95

Уважаемые авторы и читатели!

Редакция и редакционная коллегия сообщают:

межотраслевой научно-технический журнал «Автоматизация. Современные технологии»

успешно прошёл аккредитацию в ВАК при Минобрнауки России

для публикации работ соискателей учёных степеней по отрасли науки:

05.00.00 — технические науки

и четырём группам специальностей:

05.02.00 — машиностроение и машиноведение;

05.07.00 — авиационная и ракетно-космическая техника;

05.11.00 — приборостроение, метрология

и информационно-измерительные приборы и системы;

05.13.00 — информатика, вычислительная техника и управление.

Напоминаем: статьи следует подавать в редакцию заблаговременно!

С правилами оформления статей можно ознакомиться на сайте mashin.ru

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Компьютерное моделирование и оценка эффективности применения вибродемпфирующих покрытий. *Вестник машиностроения.* 2018. № 12.

Проанализирована эффективность применения вибродемпфирующих покрытий путём моделирования. Приведены экспериментальные характеристики исследуемых покрытий. Предложенный развитый алгоритм позволяет оценить ожидаемые динамические параметры конструкций в зависимости от их формы и характеристик вибродемпфирующих материалов.

Сравнительный анализ и синтез схем балансирных подвесок планетоходов с автономным управлением. *Вестник машиностроения.* 2018. № 12.

Проанализированы балансирные подвески шестиколёсных самоходных шасси по влиянию их кинематических схем и геометрических параметров на компоновку, проходимость и статическую устойчивость тихоходных автономных планетоходов. Приведены результаты синтеза новой схемы подвески для четырёхколесного шасси и результаты расчёта её характеристик.

Моделирование и оптимизация процесса формообразования сортового профиля в закрытых роликовых калибрах. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2018. Т. 16. № 12.

Разработана иерархическая гибридная модель формообразования сортового профиля в предчистовых закрытых калибрах роликовых волок на основе повышения эффективности процесса в результате удаления избыточного металла в компенсационные устройства. Модель реализована технологическим алгоритмом для поиска оптимальных значений параметров процесса.

Технологические особенности восстановления валов плазменной наплавкой. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2018. Т. 16. № 12.

Показана возможность применения метода плазменно-порошковой наплавки при восстановлении изношенных наружных цилиндрических поверхностей балансиров боевой машины пехоты. Разработаны технология и оборудование для наплавки и механической обработки.

Техника определения адгезионной прочности клееполимерных дисперсных композитов при наличии большого количества исследуемых параметров. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2018. Т. 14. № 12.

Разработано приспособление для испытаний на адгезионную прочность клееполимерных дисперсных самотвердеющих композитов, которое обладает высокой степенью универсальности. С его помощью можно проводить оценку прочности сцепления материала покрытия с подложкой при наличии большого количества исследуемых параметров: состав и строение композитов, состояние поверхности и материал подложки.

Повышение износостойкости деталей землеройной техники, эксплуатирующихся в условиях холодного климата. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2018. Т. 14. № 12.

В условиях Севера и Арктики наблюдается повышенный износ деталей буровой и землеройной техники. В связи с этим одной из важных задач является повышение срока службы режущих деталей землеройной техники, работающей при низких температурах. Проведены комплексные исследования материалов однотипных коронок на стойку бульдозера Komatsu D275 разных мировых производителей — КНР (трёх фирм-производителей), Австралии, Италии и России. Экспериментальные исследования включали: испытания на статическое растяжение, ударный изгиб, измерение твёрдости, спектральный анализ, ударно-абразивный износ. Выявлено, что износостойкость наплавленного металла электрода марки Т590, полученного импульсно-дуговой наплавкой, больше на 31 % по сравнению со стационарным режимом. Установлено, что усреднённый массовый износ материала коронок на стойку бульдозера в 2,3 раза выше, чем наплавленных слоёв, полученных с применением различных сварочных материалов и технологий.

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 04.12.2018.
Подписано в печать 22.01.2019.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

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

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