Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

Том 71

4

2017

Главный редактор

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
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»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехнический ун-т (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 политехнич. ин-т (Польша)

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

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г.
ПИ № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство
"Инновационное машиностроение"

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-03-36

© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2017

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Денисенко А.Ф., Круцило В.Г., Якимов М.В. Разработка роторных установок для переработки медицинских отходов 147

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Гребёнкин Р.В., Казаков Д.В. Исследование формирования показателей надёжности процесса центробежно-ротационной обработки . . . 152

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Бобков В.И. Оптимизация химико-технологической системы обжига окомкованного сырья в плотном слое 157

Шалумов М.А., Шалумов А.С., Шалумова Н.А., Кофанов Ю.Н. Автоматизация моделирования тепловых процессов печатных узлов с использованием радиаторов . . 162

Клячкин В.Н., Зенцова Е.А. Модель затрат для многомерной контрольной карты Хотеллинга. 167

Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Лившиц А.В. Определение фазовых и релаксационных переходов в полимерных материалах. 171

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Молчанский А.В., Барабаш Ж.А. Облик автоматизированной информационной системы формирования документации при производстве деталей летательных аппаратов в условиях совмещённого производства. 176

Железникова О.Е., Кокинов А.М., Синицына Л.В., Микаева С.А. Оценка состояния рецепторного аппарата органа зрения в условиях освещения светодиодами. 180

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Ноженкова Л.Ф., Исаева О.С., Вогоровский Р.В. Автоматизация испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата 184

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Загидуллин Р.Р. Обоснование горизонта планирования при составлении расписаний в автоматизированных системах. 189

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Denisenko A.F., Krutsilo V.G., Yakimov M.V. Development of rotary facilities for the reprocessing of medical waste 147

Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Grebenkin R.V., Kazakov D.V. Investigation of reliability indicators formation of the centrifugal rotary machining 152

MODERN TECHNOLOGY

Bobkov V.I. Optimization of chemical-technological system for pelletized rau stock burning in a consistent layer . 157

Shalumov M.A., Shalumov A.S., Shalumova N.A., Kofanov Yu.N. Modeling automation of thermal processes in the printing assemblies through the use of radiators. 162

Klyachkin V.N., Zentsova E.A. Expenditure model for multidemensionale Hotelling control chart 167

Filippenko N.G., Butorin D.V., Livshits A.V. Determination of phase and relaxation transition in polymer materials 171

INFORMATION TECHNOLOGY

Molchanskiy A.V., Barabash Zh.A. The appearance of an automated information system for documentation forming at the aircraft parts manufacture in a combined production 176

Zheleznikova, Kokinov A.M., Sinitsyna L.V., Mikaeva S.A. Condition evaluation of the organ of sight receptor apparatus in conditions of LEDs lighting . . . 180

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vogorovskiy R.V. The command and program control test automation of the spacecraft on-board facility 184

ECONOMICS AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Zagidullin R.R. Justification of the planning horizon at scheduling in automated systems 189

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 30.01.2017.
Подписано в печать 22.03.2017.
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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2017

УДК 614.75

А.Ф. Денисенко, д-р техн. наук, проф., **В.Г. Круцило,** канд. техн. наук, доц., **М.В. Якимов**
(Самарский государственный технический университет)

ask@samgtu.ru

РАЗРАБОТКА РОТОРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДИЦИНСКИХ ОТХОДОВ

На основании анализа морфологического и структурного составов отходов лечебно-профилактических учреждений сформулированы основные критерии, определяющие выбор компоновки роторных систем по переработке медицинских отходов, и рекомендации по конструкции инструментальной наладки. В связи с тем что переработка отходов сочетает процессы резания лезвием и дробление, рекомендовано изготавливать их из быстрорежущей стали с несимметричной заточкой лезвия.

Ключевые слова: медицинские отходы; компоновка; стерилизационная камера; инструментальная наладка; ножи; инструментальный материал.

The basic criteria for the layout selection of rotor systems for the reprocessing of medical waste are formulated on the grounds of the morphological and structural composition analysis of the medical institutions waste. Recommendations for the tool rigging design are formulated too. Due to the fact that the waste reprocessing combines cutting with blade and grinding, it is recommended to produce this tool rigging from high-speed steel with asymmetric sharpening of blades.

Keywords: medical waste; layout; sterilization chamber; tool rigging; knives; tool material.

Переработка отходов в большинстве случаев связана с необходимостью придания им определённого вида, обеспечивающего возможность их утилизации [1].

Быстрые темпы урбанизации и современное развитие здравоохранения в нашей стране обусловливают актуальность проблемы переработки медицинских отходов.

В настоящее время в Российской Федерации ежегодно образуется не менее 1 млн т медицинских отходов, что составляет около 2 % от общего количества отходов потребления [2]. Медицинские отходы в зависимости от степени их эпидемиологической, токсикологической и радиационной опасности, а также негативного воздействия на среду обитания подразделяются на пять классов [3]. Для обращения с каждым из них определены свои правила.

Эпидемиологическая опасность медицинских отходов определяется наличием в их составе химически активных и даже ядовитых веществ. Вследствие этого простая утилизация без переработки и обеззараживания медицинских отходов невозможна.

Кроме того, механическая переработка медицинских отходов (измельчение) тоже достаточно проблемна из-за неоднородности физико-механических свойств перерабатываемых материалов.

К перерабатываемым медицинским материалам, подвергаемым измельчению и стерилизации (утилизации), можно отнести [4]:

биологические отходы: патолого-анатомические отходы (удалённые конечности, органы, кости, ткани, опухоли, плаценту и т. п.); трупы лабораторных животных и др.;

целлюлозу: упаковочный картон, салфетки, полотенца, писчую бумагу, пакеты, газеты и т.д.;

текстиль: использованные бинты, вату, салфетки, марлю и т.п.;

полимерные отходы: использованные одноразовые шприцы, системы переливания крови и системы для инфузионных растворов, использованные одноразовые чашки Петри, зонды, трубки, катетеры, материалы для диализа, мешки, контейнеры и пр.;

металл: сломанные медицинские инструменты, скальпели, иглы для шприцев, проволочные шины, лезвия и т.п.;

стекло: ампулы, банки, бутылки, флаконы, пробирки, чашки Петри и т.п.;

лабораторные отходы, относящиеся к категории "инфекционные": отходы микробиологических лабораторий (патологический материал, среды с патогенными микроорганизмами), отходы клинических, биохимических, гистологических лабораторий (кровь, мочу, патогенный материал и др.);

фармацевтические препараты: твёрдые и жидкие химикаты; дезинфицирующие средства, токсичные вещества, цитотоксины;

пищевые отходы: остатки процессов приготовления и потребления пищевых продуктов;

рентгеновскую пленку: использованные рентгеновские снимки, просроченную рентгеновскую пленку;

фотоматериалы: использованные и просроченные фотопленку и фотоснимки, использованные растворы фиксажа и проявителя;

резину: трубки, перчатки.

Имеющиеся данные [4] свидетельствуют о том, что около половины общего количества отходов составляют пищевые отходы и отходы из административно-хозяйственных помещений (бумага, картон), а с учетом текстильных отходов данные три фракции в совокупности составляют более 90 % всех отходов медицинского учреждения. Кроме того, следует отметить значительное увеличение удельного веса полимерных материалов, составляющих в последние годы 10 % и более в общей структуре отходов.

В России и за рубежом выпускают широкую номенклатуру установок для переработки медицинских отходов от самых простых до высокотехнологичных автоматизированных. Наиболее эффективными являются установки роторного типа. На отечественном рынке такие установки широко представлены фирмой Newster (Италия).

Одним из способов переработки несортированных медицинских отходов классов "Б" и "В" [3] является термохимический способ, когда сочетается нагревание отходов с обработкой их дезинфицирующими составами. Загруженные в стерилизационную камеру отходы измельчаются быстровращающимися в горизонтальной плоскости массивными острыми ножами. Одновременно за счёт трения измельчаемых отходов о стенки камеры происходит их нагревание до 150...160 °С. Обеззараживание отходов происходит вследствие их нагрева и контакта с продуктами распада гипохлорита натрия (газообразным хлором и окисью хлора), который впрыскивается в камеру.

Таким образом, процесс стерилизации медицинских отходов на этой установке включает в себя:

измельчение отходов со значительным сокращением объёма (до 75...80 %);

отделение жидких составляющих в отходах за счёт испарения (сокращение массы перерабатываемого материала на 25...30 %);

стерилизацию протеинов и присутствующих вирусов за счёт термической обработки во влажной среде.

Основной частью используемых для такой переработки устройств является стерилизационная камера (рис. 1), выполненная из коррозионно-стойкой стали, в нижней части которой на оси вращающегося ротора установлена траверса *1* с закреплёнными на ней четырьмя горизонтальными ножами *2* и П-образным вертикальным ножом *6*. Вращающиеся ножи взаимодействуют с четырьмя неподвижными ножами *3*, установленными на внутренней поверхности стерилизационной камеры. Температура в камере во время процесса утилизации контролируется датчиком *4*. Поддержание температуры стерилизации (150...160 °С) происходит при помощи коротких автоматических впрыскиваний воды через две форсунки *5*, расположенные в верхней части камеры.

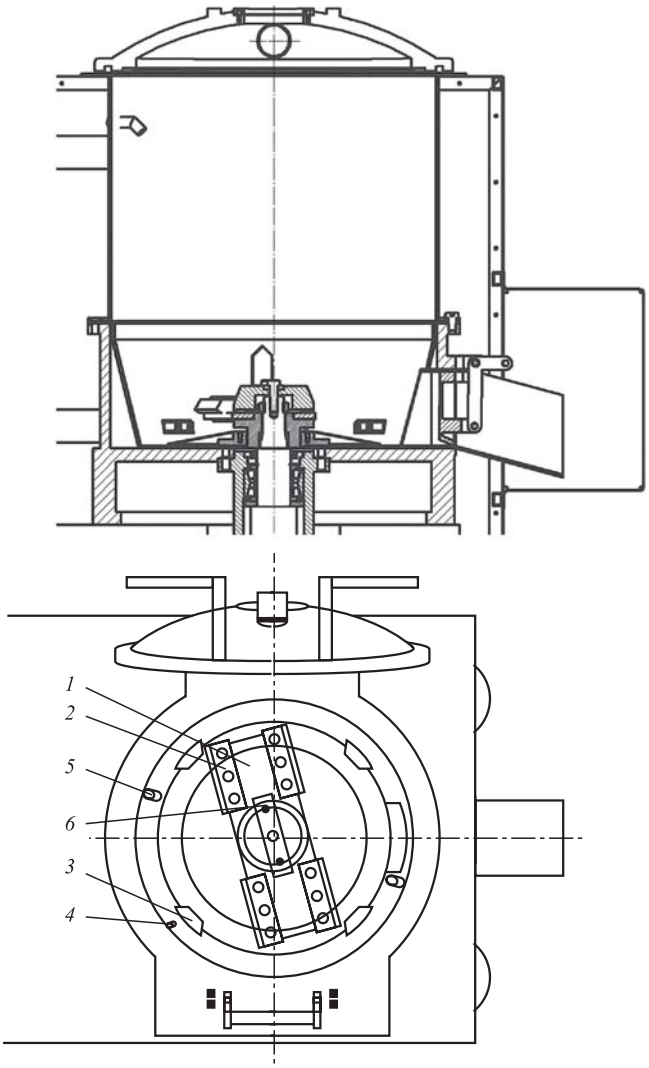


Рис. 1. Стерилизационная камера (вид сверху при открытой крышке)

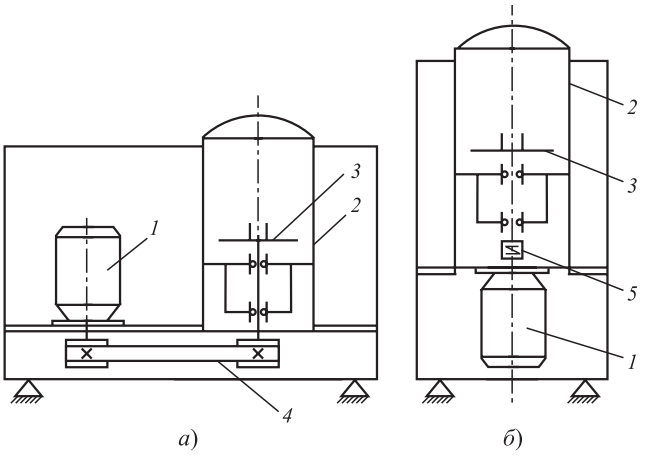


Рис. 2. Компоновка установки:
1 — приводной двигатель; *2* — стерилизационная камера; *3* — ротор; *4* — ременная передача; *5* — соединительная муфта

Для реализации конструкции, представленной на рис. 1, могут быть использованы два компоновочных решения, отличающихся устройством приводного средства (рис. 2).

Первый вариант компоновки (рис. 2, *а*) предполагает использование ременной передачи, соединяющей валы приводного двигателя и исполнительного ротора.

Второй вариант (рис. 2, *б*) предусматривает соосное расположение валов двигателя и ротора, соединённых через муфту.

Сравнительные показатели рассматриваемых вариантов по критериям технологичности, обслуживания и эксплуатации приведены в таблице. Анализ представленных критериев оценки компоновки демонстрирует предпочтительность первого варианта. Некоторое увеличение площади установки при первом варианте компоновки не является критичным, поскольку конструкция предполагает наличие ряда дополнительных устройств (пневмо- и гидроаппаратуры), для которых можно использовать дополнительный объём, обеспеченный свободным пространством вокруг двигателя.

Сравнительные показатели компоновки установки по переработке медицинских отходов

Критерий оценки компоновки	Вариант 1 (см. рис. 2, *а*)	Вариант 2 (см. рис. 2, *б*)
Площадь установки	—	+
Необходимость периодической замены изношенных ремней	—	+
Доступ к узлу ротора для контроля и замены опор	+	—
Удобство расположения по высоте зоны загрузки и выгрузки	+	—
Вибрационная устойчивость установки	+	—
Технологичность основания камеры стерилизации	+	—
Обозначения: "+" — преимущество; "–" — недостаток.		

Инструментальная наладка, включающая подвижные и неподвижные ножи, а также элементы их крепления, является одной из важнейших и наиболее быстроизнашиваемых частей установки.

В связи со структурным и морфологическим составами медицинских отходов их измельчение происходит за счёт резания и дробления. При переработке мягких и пластичных материалов измельчение происходит за счёт резания лезвием (ножом). При измельчении хрупких материалов разрушение осуществляется ударным воздействием.

Форма ножей зависит от свойств измельчаемого материала. Поскольку масса перерабатываемых медицинских отходов обладает сильно выраженными упругими свойствами, то, как подчёркивается в работе [5], должна выбираться форма режущего лезвия с фасками, которые воспринимают до 70 % усилия резания. Фаски растягивают волокна перерабатываемого материала, усиливая противорежущий подпор кромке лезвия, что улучшает условия резания и уменьшает потребное давление на кромке лезвия [5].

Особенностью дробления хрупких материалов является появление в зоне контактов этих материалов с элементами ротора упругих деформаций с дальнейшим формированием трещины и её развитием до критических размеров [6].

Эффективность переработки медицинских отходов зависит от многих факторов, в частности от инструментальных материалов, конструкции инструментальной наладки и технологических режимов.

Анализ конструкций инструментальных наладок зарубежных и отечественных установок показал, что наиболее перспективной является конструкция, представленная на рис. 3.

На траверсе *2* с помощью болтов *6* закрепляются подвижные горизонтальные ножи *1*, *3...5* и П-образный вертикальный нож *7*.

Траверса *2* закреплена на вращающемся приводном валу. Кроме того, на внутренней поверхности стерилизационной камеры закреплены неподвижные ножи. Подвижные

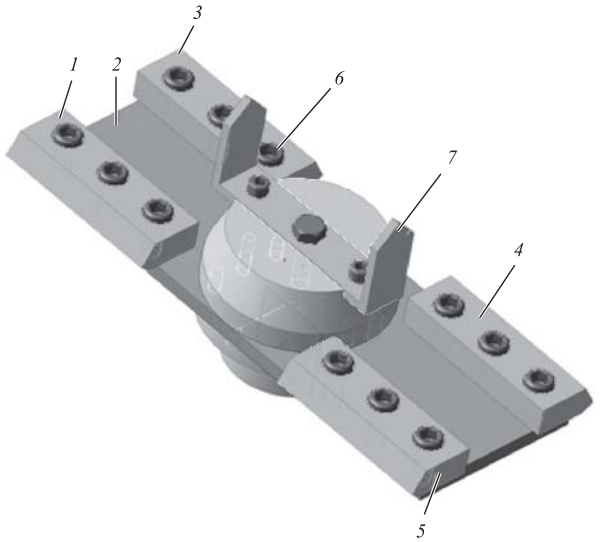


Рис. 3. Общий вид инструментальной наладки (без неподвижных ножей)

ножи служат собственно для измельчения медицинских отходов, неподвижные ножи — для задержки и перемешивания перерабатываемой вращающейся массы, П-образные вертикальные ножи — для разрушения (разрыва) упаковочных мешков и пакетов. Наличие четырёх горизонтальных ножей и двухсторонняя заточка неподвижных ножей позволяют использовать режим реверса вращения ротора для повышения эффективности переработки.

Наиболее важным элементом инструментальной наладки являются подвижные ножи *1*, *3...5*. От материала, формы и углов заточки этих ножей зависят их износостойкость и эффективность переработки отходов.

При выборе инструментального материала установки для переработки медицинских отходов отечественными и зарубежными производителями используется широкая номенклатура таких материалов, которая подразделяется на четыре основные группы (рис. 4) [7, 8].

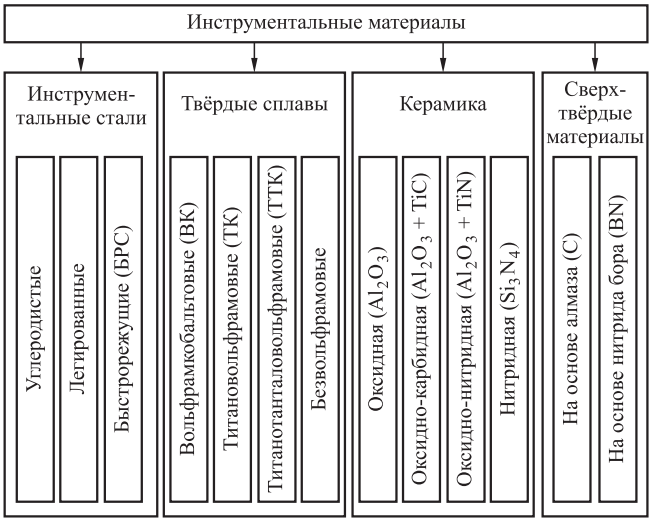


Рис. 4. Основные группы инструментальных материалов

В процессе переработки медицинских отходов рабочие поверхности ножей подвергаются интенсивному воздействию высоких контактных давлений, а взаимодействие с обрабатываемым материалом и реагентами из окружающей среды приводит к интенсивному протеканию физико-химических процессов — адгезии, диффузии, окисления и коррозии. Чтобы ножи могли сопротивляться действующим на них нагрузкам, инструментальные материалы должны соответствовать комплексу требований.

Ниже рассмотрены основные требования применительно к условиям переработки медицинских отходов.

Твёрдость. Чтобы ножи, не деформируясь, могли перерабатывать необходимые объёмы материалов, твёрдость инструментальных материалов $HV_{ИМ}$ должна значительно (более чем в 2,5 раза) превосходить твёрдость обрабатываемых материалов $HV_{ОМ}$. Однако чрезмерное увеличение твёрдости, как правило, приводит к увеличению хрупкости, снижению вязкости и трещиностойкости инструментальных материалов. Поэтому существует оптимальное отношение $HV_{ИМ}/HV_{ОМ}$, зависящее от условий обработки и обеспечивающее приемлемое соотношение твёрдости и вязкости инструментальных материалов.

Механическая прочность — способность ножей сопротивляться большим механическим нагрузкам без хрупкого разрушения и заметного пластического деформирования. Так как ножи при переработке медицинских отходов эксплуатируются в условиях циклических нагрузок, то наряду с механической прочностью инструментальные материалы должны обладать высоким сопротивлением разрушению при циклическом нагружении, т.е. высоким пределом выносливости.

Износостойкость — способность режущих ножей сопротивляться удалению частиц с их рабочих поверхностей при взаимодействии с обрабатываемыми материалами. Этот показатель является комплексным свойством и зависит от перечисленных выше свойств — твёрдости и прочности.

Технологичность — комплекс свойств, характеризующий поведение инструментальных материалов при изготовлении режущих ножей. Технологичность определяет возмож-

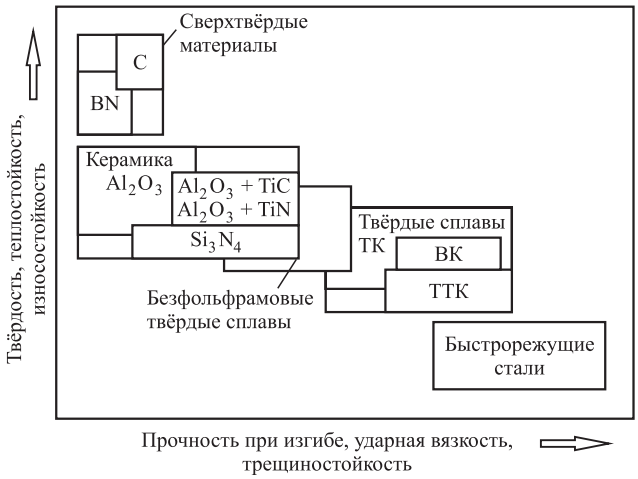


Рис. 5. Свойства инструментальных материалов

ность использования конкретной марки инструментального материала в конструкции конкретного режущего ножа.

Экономичность — свойство инструментальных материалов, которое в основном зависит от их химического состава. Введение большого количества дорогостоящих легирующих элементов (вольфрама, кобальта и др.) существенно увеличивает стоимость инструментальных материалов и сужает область их применения.

Данные, представленные на рис. 5 [8], наглядно демонстрируют, что ни один из существующих инструментальных материалов не сочетает в себе весь комплекс перечисленных требований. Именно поэтому инструментальные материалы не являются универсальными и специализированы для конкретных условий обработки.

Анализ наиболее распространённых конструкций установок для переработки медицинских отходов зарубежных и отечественных производителей показал, что для инструментальных наладок используются высокопрочные чугуны, инструментальные углеродистые стали, легированные и быстрорежущие стали. Среди перечисленные материалов быстрорежущие стали имеют ряд преимуществ: они сочетают высокие значения твёрдости (до 65...70 HRC) с высокими уровнями механической прочности и ударной вязкости; позволяют использовать более острые углы заточки; обладают хорошими шлифуемостью и обрабатываемостью, а также допускают высокие скорости переработки. Кроме того, быстрорежущие стали обладают достаточно высокой технологичностью, так как хорошо обрабатываются в отожжённом состоянии.

Поперечное сечение подвижных односторонних ножей показано на рис. 6, *а*.

Ножи затачиваются под углами γ и α на всю длину l по верхней поверхности *ОС* и нижней поверхности *ОД*. Рекомендуется осуществлять несимметричную заточку ножей, используя соотношение $\gamma < \alpha$, что позволит направить в нижнюю часть ножа, где имеется дополнительное сопротивление из-за наличия траверсы, меньшую часть разрезаемого слоя.

По экономическим соображениям можно предложить более эффективную конструкцию двухсторонних подвижных ножей (рис. 6, *б*), позволяющую по достижении предельного износа одной стороны осуществить их перестановку и задействовать вторую сторону. Такая конструкция увеличивает долговечность ножей в два раза при небольших дополнительных затратах по сравнению с односторонними ножами.

При выборе оптимальных углов заточки ножей [5] необходимо иметь в виду, что при переработке отходов возникают значительные силы, действующие на ножи, что приводит к существенным деформациям роторной системы и изменению фактических углов заточки. Это подтверждается результатами конечно-элементного моделирования упругодеформированного состояния роторной системы (рис. 7) при следующих исходных данных: площадь верхней грани ножа 2080 мм^2, нижней грани — 1200 мм^2; давление, действующее на каждую грань, составляет 1 МПа. Они показывают, что деформации конструкции приводят к перемещению вершин ножей на 0,000106 м.

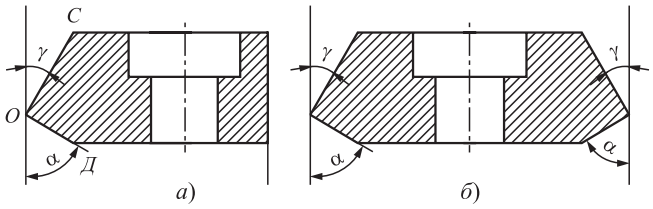


Рис. 6. Поперечное сечение подвижного ножа:
а — одностороннего; *б* — двухстороннего

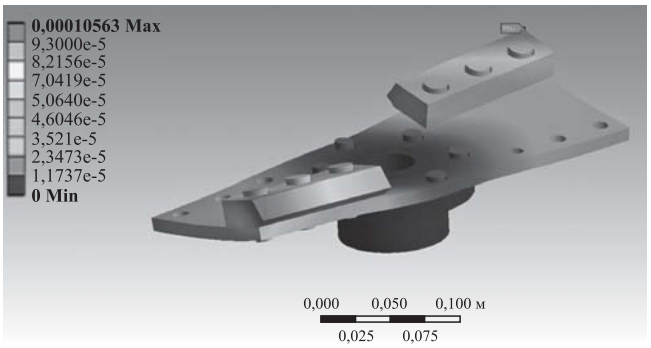


Рис. 7. Конечно-элементное моделирование упругодеформированного состояния роторной системы

Таким образом, на основании анализа морфологического и структурного составов отходов лечебно-профилактических учреждений сформулированы основные критерии, определяющие выбор компоновки роторных систем по переработке медицинских отходов. Показано, что переработка отходов сочетает процессы резания лезвием и дробление. Сформулированы следующие положения, которые можно использовать при выборе конструкции инструментальной наладки:

наиболее рациональной является компоновка с использованием ремённой передачи;

предпочтительным материалом инструментальной наладки являются быстрорежущие стали;

целесообразно использовать несимметричную заточку ножей;

более экономичной является конструкция ножей с двухсторонней заточкой, позволяющая с осуществлением перестановки ножей максимально использовать инструментальный материал.

Библиографические ссылки

1. **Бобович Б.Б.** Переработка промышленных отходов. М.: СП "Интермет Инжиниринг", 1999. 445 с.

2. **Акимкин В.Г.** Организация обращения с медицинскими отходами в Российской Федерации. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. 32 с.

3. **Правила** сбора, хранения и удаления отходов лечебно-профилактических учреждений. САНПИН 2.1.7.728-99.

4. **Ершов А.Г., Шубников В.Л.** Внутриучрежденческая система обращения с медицинскими отходами [Электронный ресурс] URL: http://ecologcontrol.ru/vnutriuchrezhdencheskaya-sistema-obrashheniya-s-meditsinskimi-othodami (дата обращения: 12.03.2016).

5. **Резник Н.Е.** Теория резания лезвием и основы расчёта режущих аппаратов. М.: Машиностроение, 1975. 311 с.

6. **Клушанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А.** Дробилки. Конструкция, расчёт, особенности эксплуатации. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.

7. **Справочник** конструктора-инструментальщика / под общ. ред. В.А. Гречишникова и С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2006. 542 с.

8. **Режущий** инструмент / под ред. С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 2004. 512 с.

УДК 621.048

М.А. Тамаркин, д-р техн. наук, проф., **Э.Э. Тищенко,** канд. техн. наук, доц., **Р.В. Гребёнкин**
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону),
Д.В. Казаков
(Ferhau Engineering Gmbh, Wiesbaden, Германия)

lina_tishenko@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЁЖНОСТИ ПРОЦЕССА ЦЕНТРОБЕЖНО-РОТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Представлены результаты исследований процесса центробежно-ротационной обработки деталей в среде стальных шариков. Получен комплекс моделей формирования показателей надёжности технологического процесса, позволяющих обеспечить повышение эффективности и достижение заданной величины и стабильности параметров качества обрабатываемой детали. Разработана методика проектирования технологических процессов.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая центробежно-ротационная обработка деталей; надёжность технологического процесса; коэффициенты надёжности.

The research results of the workpiece centrifugal rotary machining in steel balls medium are introduced. Prepared Models complex for formation of the technological process reliability indicators, allowing to provide efficiency increasing and achieve the desired size and stability of the workpiece quality parameters. The methodology of the technological processes construction is developed.

Keywords: finishing and reinforcing centrifugal rotary machining of workpiece; technological process reliability; safety factors.

Быстрорастущие требования к точности размеров и геометрической форме деталей, а также к качеству их поверхности характеризуют технический прогресс в современном производстве. Анализ применяемых в машиностроении технологических процессов по-

казывает, что они подчиняются закономерностям, раскрытие которых необходимо для прогнозирования и эффективного управления этими процессами. Статистические оценки качества изготавливаемых изделий и математическое описание технологических процессов являются наиболее часто используемыми методами анализа в настоящее время.

Вопросам надёжности изделий и технологических процессов их создания посвящено немало известных работ [1—4]. В них изложены вопросы выбора и оценки эффективности технологических решений, математические методы расчёта и анализа надёжности, способы оценки надёжности, а также методы планирования управляющих воздействий.

В качестве объекта исследования надёжности выбран технологический процесс отделочно-упрочняющей центробежно-ротационной обработки (ОУ ЦРО) в среде стальных шариков. Обработка, основанная на пластическом деформировании тонкого поверхностного слоя при помощи гранулированной рабочей среды (в данном случае стального шарика), имеет по сравнению с другими финишными методами обработки поверхности множество преимуществ и не требует применения сложного оборудования и оснастки. ОУ ЦРО может быть применена на операциях упрочнения, отделки заготовок сложной формы, удаления заусенцев, скругления острых кромок, очистки поверхности (от окалины, ржавчины, нагара, накипи и т.д.), подготовки заготовок под покрытия (гальванические, лакокрасочные, резиновые, клеевые и др.). Обработке могут подвергаться детали разнообразных форм и размеров, изготовленные из различных материалов.

Надёжность технологического процесса — это его свойство обеспечивать требуемые точность и качество детали, получаемые обработкой заготовки на одном или на нескольких этапах при условии сохранения промежуточных технологических параметров точности и качества в установленных пределах.

Технологический процесс, в том числе и ОУ ЦРО, — это сложная динамическая система, в которой объединены оборудование, средства контроля и управления, вспомогательные и транспортные устройства, обрабатывающий инструмент или среды, находящиеся в постоянном движении и изменяющие своё положение, объекты производства (заготовки, полуфабрикаты, готовые изделия) и, наконец, люди, осуществляющие процесс или управляющие им.

Для выполнения поставленных задач любой технологический процесс должен обладать высокой надёжностью. К сожалению, имеется ряд трудностей в обеспечении надёжности технологических процессов, к которым можно отнести сложность технологических систем, высокие требования к самой надёжности процесса, а также наличие многочисленных и разнообразных взаимосвязей внутри технологической системы.

Однако стоит отметить и положительные свойства технологических систем, которые облегчают задачу достижения высокой надёжности реализуемых в них технологических процессов: возможность вводить дополнительный контроль, т.е. изменять структуру системы и её элементов, ужесточать требования к отдельным операциям, разбивать операции на ряд переходов, изменять режим работы.

При изменении условий, в которых протекает технологический процесс и которые влияют на его течение в автоматическом режиме или в результате спланированных целенаправленных действий обслуживающего персонала, процесс может принимать управляемый характер, что способствует достижению требуемого уровня надёжности.

Оптимальное соотношение качественных и количественных показателей технологического процесса является одной из основных его особенностей. При осуществлении любого технологического процесса в основе лежит, как правило, стремление обеспечить как требуемый уровень качества, так и высокую производительность технологического процесса. Однако повышение производительности технологического процесса может привести к снижению качества или, наоборот, более высокое качество может быть получено за счёт низкой производительности, т.е. эти две стороны часто вступают в противоречие друг с другом. Отсюда надёжность технологического процесса должна обеспечиваться как по качественным, так и по количественным показателям.

Исследования надёжности технологических процессов регламентируются ГОСТ 27.202—83 [2], согласно которому при контроле технологического процесса по количественному признаку определяют значения показателей точности.

Не следует путать свойство надёжности технологического процесса с понятиями точности и стабильности.

Под точностью понимается свойство технологического процесса обеспечивать соответствие поля рассеивания значений показателя

качества изготовления продукции заданному полю допуска и его расположению, а под стабильностью понимается свойство технологического процесса сохранять показатели качества изготовляемой продукции в заданных пределах в течение некоторого времени (согласно ГОСТ 16949—71). Таким образом, из упомянутых выше определений следует, что надёжность — понятие динамическое, а точность характеризует технологический процесс в определённый фиксированный момент времени, в статике. Поэтому точность технологического процесса нужно рассматривать как составную часть свойства надёжности системы.

В процессе расчёта надёжности технологических систем следует исходить из заданных показателей качества готового изделия и номинальных значений, которые заранее прописаны в конструкторской документации. Перед технологом стоит задача: без рассмотрения технического уровня самих изделий оценить, насколько процесс изготовления обеспечивает соблюдение установленных требований. Несмотря на то что продукция при реализации такого технологического процесса может быстро устаревать морально или же иметь низкое качество, сам технологический процесс может обладать высокой надёжностью.

Наиболее значимые доминирующие факторы, оказывающие наиболее сильное влияние на выходные переменные объекта управления (технологического процесса), следующие:

факторы, связанные с заготовкой, поступающей на обработку (жёсткость, твёрдость, предел текучести, коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности, соответствие материала заготовки материалу, указанному в техническом задании);

режимы обработки (объём загрузки рабочей камеры, частота вращения ротора, объём подаваемой технологической жидкости);

характеристики рабочей среды (диаметры шаров, масса шаров);

человеческий фактор.

Надёжность технологического процесса ОУ ЦРО в значительной степени зависит от решений, принимаемых человеком, начиная со стадии проектирования технологического процесса, на котором закладывается проектная надёжность, и заканчивая контролем изготовленных изделий.

На стадии проектирования технологического процесса технолог выбирает оборудование, инструмент (обрабатывающую среду), назначает количество ступеней и режимы обработки (частота вращения дна рабочей камеры, время обработки, скорость промывки), состав и концентрацию технологической жидкости, объём загрузки и т.д.

На стадии реализации технологического процесса оператор должен обеспечить выполнение технологического процесса, спроектированного технологом (технологическая дисциплина). На стадии контроля контролёр должен обеспечить контроль в заданном объёме с применением технических средств контроля, заложенных технологом в технологический процесс.

При проведении предварительных исследований установлено, что наибольшее влияние на надёжность технологического процесса ОУ ЦРО оказывают решения, принимаемые технологом. Для того чтобы уменьшить риск принятия технологом некорректного решения, снижающего надёжность технологического процесса, необходимо вооружить его информацией о влиянии отдельных факторов, характерных для рассматриваемого процесса, на его надёжность. Для этого необходимо провести теоретические и экспериментальные исследования определения степени влияния этих факторов.

Для анализа надёжности технологических процессов согласно ГОСТ 27.202—83 используются коэффициенты для описания надёжности технологических процессов механической обработки деталей. При контроле технологических процессов по количественному признаку определены следующие значения показателей точности.

Коэффициент точности (по контролируемому параметру)

$$K_{\text{Т}} = \frac{\omega^P}{T},$$

где ω^P — поле рассеяния, или разность максимального и минимального значений контролируемого параметра за установленное (контрольное) время; T — допуск на контролируемый параметр.

При нормальном законе распределения контролируемого параметра

$$\omega^P = 6\sigma,$$

где σ — среднеквадратическое отклонение контролируемого параметра.

Процесс или его элемент стабильно обеспечивает точность контролируемого параметра, если

$$K_{\text{Т}} \leqslant K_{\text{т.о}} \leqslant 1,$$

где $K_{\text{т.о}}$ — нормативное (предельное, технически обоснованное) значение $K_{\text{Т}}$.

Коэффициент мгновенного рассеивания (по контролируемому параметру)

$$K_{\rho}(\tau) = \frac{\omega^{P}(\tau)}{T},$$

где $\omega^{P}(\tau)$ — поле рассеяния контролируемого параметра в момент времени τ.

Коэффициент смещения (контролируемого параметра)

$$K_{\text{см}}(\tau) = \frac{\overline{\Delta}(\tau)}{T},$$

где $\overline{\Delta}(\tau)$ — среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска в момент времени τ;

$$\overline{\Delta}(\tau) = \left|\overline{y}(\tau) - y_0\right|,$$

где $\overline{y}(\tau)$ — среднее значение контролируемого параметра; y_0 — значение параметра, соответствующее середине поля допуска (при симметричном поле допуска значение y_0 совпадает с номинальным значением параметра $y_{\text{ном}}$).

Коэффициент запаса точности (по контролируемому параметру)

$$K_{\text{з}}(\tau) = 0{,}5 - K_{\text{см}}(\tau) - 0{,}5K_{\rho}(\tau).$$

При контроле точности должно выполняться условие $K_{\text{з}}(\tau) > 0$.

Очевидно, что надёжность технологического процесса в значительной мере определяется величиной допуска на контролируемый параметр качества обработки. Для ОУ ЦРО контролируемыми параметрами могут служить среднее арифметическое отклонение шероховатости поверхности, глубина и степень упрочнения. Пользуясь комплексом моделей, полученных для процесса ОУ ЦРО [5, 6], можно рассчитать величину показателей точности процесса на стадии технологического проектирования, что позволит прогнозировать надёжность принятого к производству технологического процесса.

Проведено компьютерное моделирование влияния величины допуска контролируемого параметра на надёжность технологического процесса. На рис. 1 и 2 представлены результаты исследований.

Анализируя результаты проведённых исследований, можно сделать вывод, что технологический процесс ОУ ЦРО обеспечивает получение требуемых параметров качества поверхности детали в ходе обработки в пределах величины поля допуска в определённом интервале изменения технологических режимов и характеристик рабочих сред.

На основании результатов проведённых исследований разработана методика проектирования технологических процессов ОУ ЦРО, обеспечивающих требуемую надёжность технологического процесса, а также методика аналитического прогнозирования общей надёжности технологических процессов ОУ ЦРО в среде стальных шариков. В качестве ограничительной функции, в зависимости от решаемых технологических задач, будут ис-

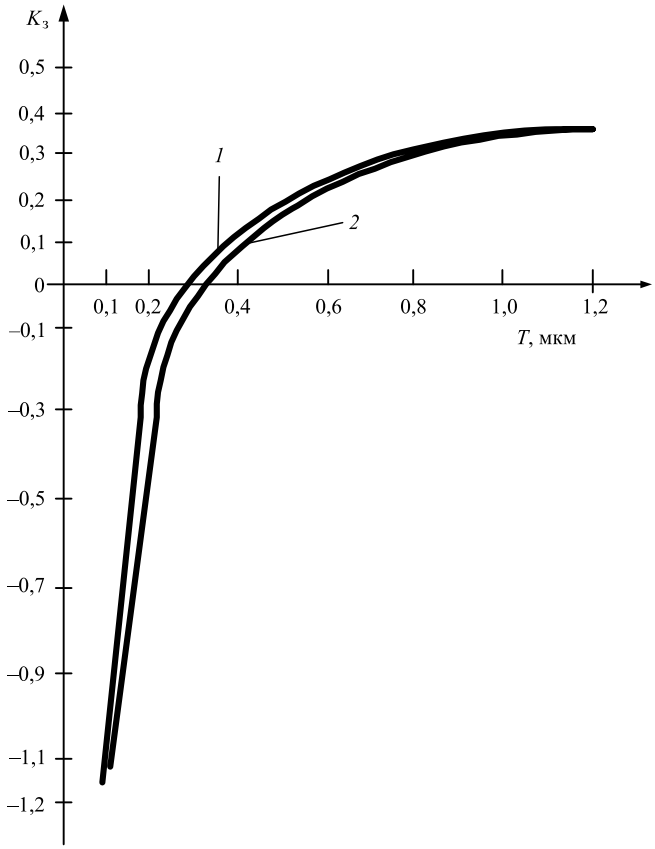


Рис. 1. Влияние величины допуска на надёжность технологического процесса. Контролируемый параметр — глубина упрочнённого слоя $h_{\text{н}}$. Диапазон изменения допуска 0,1—1,2 мм с шагом 0,1 мм; диаметр шарика 4 мм; материал детали — сталь 45:
1 — $\gamma = 6$ с$^{-1}$; *2* — $\gamma = 9$ с$^{-1}$

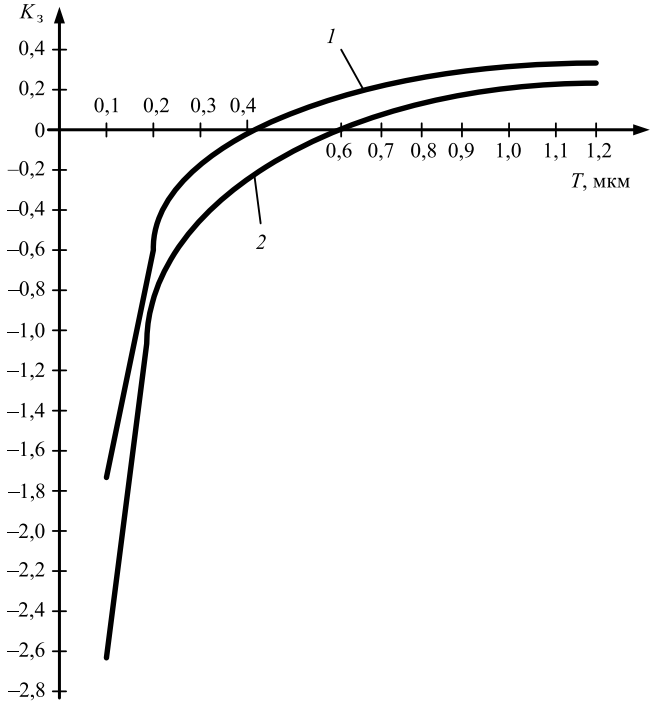


Рис. 2. Влияние величины допуска на надёжность технологического процесса. Контролируемый параметр — шероховатость поверхности *Ra*. Диапазон изменения допуска 0,1—1,2 мкм с шагом 0,1 мкм; диаметр шарика 4 мм; материал — Ст45:
1 — $\gamma = 6$ с$^{-1}$; *2* — $\gamma = 9$ с$^{-1}$

пользоваться шероховатость поверхности, глубина упрочнённого слоя, степень упрочнения или несколько параметров одновременно.

Исходные данные, необходимые для начала расчёта, вводятся в диалоговом режиме. Задаются значения исходной и заданной шероховатости поверхности, заданной глубины упрочнённого слоя и степени упрочнения, характеристики материала детали, диапазон диаметров шариков частоты вращения ротора, тип оборудования, значение допуска на контролируемый параметр обработанной поверхности. По полученным зависимостям рассчитывается значение установившейся шероховатости поверхности, глубины упрочнённого слоя и степени упрочнения.

В дальнейших расчётах рассматриваются только те варианты, которые удовлетворяют заданным условиям. Затем рассчитываются показатели точности процесса по формулам, полученным выше. Определяются: поле рассеивания значений контролируемого параметра, среднее значение отклонения контролируемого параметра относительно середины поля допуска. Рассчитывается значение коэффициента запаса точности. В случае выполнения условия $K_з > 0$ рассчитывается время обработки для каждого варианта сочетания технологических параметров и выбирается вариант, обеспечивающий минимальное время обработки, которое и считается рациональным.

Библиографические ссылки

1. **Корольков Ю.В.** Повышение надёжности технологического процесса центробежно-ротационной обработки в среде абразива. Дисс. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2011. 167 с.

2. **ГОСТ 27.202—83** Надёжность в технике. Технологические системы. Технические требования к методам оценки надёжности по параметрам производительности. 28 с.

3. **Рыжкин А.А., Слюсарь Б.Н., Шучев К.Г.** Основы теории надёжности: учеб. пособие. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ. 2002. 182 с.

4. **Дрозд М.С.** Инженерные расчёты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

5. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебеденко А.Г.** Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. 2009. Т. 9. № 3 (42). С. 48—59.

6. **Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Lebedenko V.G.** Surface-layer quality in shot treatment Russian Engineering Research // 2010. T. 30. N 2. P. 144—148.

Уважаемые читатели!

Перепечатка материаловиз журнала "Автоматизация. Современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии журнала.

При этом ссылка на журнал обязательна.

УДК 536.27

В.И. Бобков, канд. техн. наук, доц.
(Филиал ФГБОУ ВПО Национального исследовательского университета МЭИ г. Смоленск)
vovabobkoff@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОБЖИГА ОКОМКОВАННОГО СЫРЬЯ В ПЛОТНОМ СЛОЕ

Исследованы технологические термически-активируемые процессы обжига окатышей в плотном слое. Рассмотрены научно-практическая задача, оптимизация этих процессов на обжиговых машинах конвейерного типа и программируемый нагрев плотного слоя, учитывающий технические ограничения обжиговой машины и технологические особенности процессов обжига. Решена задача оптимального управления тепловыми процессами обжига.

Ключевые слова: моделирование; обжиг; оптимизация; оптимальное управление; теплотехнологии; химическая технология.

Technological thermally-activated processes of the pellet burning in the consistent layer are researched. Scientific and practical task, the optimization of these processes on the burning conveyor type machines and programmable heating of the consistent layer, taking into account the technical limitations of the burning machine and the technological features of the burning process are considered. The task of the optimal control for thermal burning processes is resolved.

Keywords: modeling; burning; optimization; optimal control; heat technologies; chemical technology.

Введение. Обжиг дисперсного материала в плотном слое применяется в химической и металлургической промышленности. При обжиге окатышей наблюдается повышенное количество возврата, незавершённость реакции диссоциации карбонатов, низкая прочность готовых окатышей. Выбор рациональных технологических схем и режимная адаптация аппаратов к периодически меняющимся свойствам сырья и ценам на энергоносители сталкиваются со значительными трудностями. Экспериментальные исследования дорогостоящи, а порой и неосуществимы в силу технологических особенностей протекания процессов при больших температурах в химически активных средах. Методики расчёта процессов термической подготовки сырья, достаточно полно учитывающие специфические особенности и свойства сырья, базируются на экспериментах. Изменение химического или гранулометрического состава сырья, цен на энергоносители влечёт за собой проведение экспериментальных исследований и адаптацию к ним агрегатов. Математическое моделирование позволяет не только определять теплофизические и химико-технологические свойства сырьевых материалов, наблюдать целевые процессы, проходящие при обжиге, но и оптимизировать их и режимные параметры [1].

Таким образом, целью настоящей работы является получение оптимальных режимов обжига сырьевых материалов, обеспечивающих требуемое качество готового продукта и в перспективе — энерго-ресурсосбережения в технологии обжига окатышей.

Постановка задачи оптимального управления. Качество готового продукта определяется минимальным содержанием влаги, завершённостью химической реакции диссоциации карбонатов, необходимой прочностью окатыша.

В зоне подогрева начинается процесс диссоциации карбонатов, который влияет на прочность окатыша. В зоне обжига прокалка проходит наиболее интенсивно и идёт процесс спекания. Упрочнение наблюдается с залечиванием пор в процессе твёрдофазного и жидкофазного спекания. Преобладание воздействия спекания обязательно, иначе получение прочных окатышей будет невозможным. Условия проведения процесса спекания определяют прочность готовых окатышей.

Процессы диссоциации карбонатов и спекание, обеспечивающее конечную прочность, будем называть целевыми процессами термической подготовки сырья.

Таким образом, задача оптимального управления целевыми процессами слоевой обработки дисперсного материала заключается в подборе

технологического режима, при котором обеспечивается необходимая степень реагирования и спекание материала при ограничениях на скорость нагрева, градиент температуры.

Технологический режим термической обработки окатышей в зоне обжига определяется температурой теплоносителя на входе в слой T_{g0} и скоростью его подачи v_{g0}. Математическое описание тепломассообменных слоевых процессов представляется в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, решение которой возможно лишь численными методами. Определить функции $T_{g0}(\tau)$ и $v_{g0}(\tau)$ аналитическими методами или вариационным исчислением не представляется возможным.

Динамическое программирование является специализированным вычислительным методом решения задач оптимизации динамических систем, позволяющим представить процесс оптимизации в виде последовательности отдельных этапов (шагов). Основу метода составляет принцип оптимальности, утверждающий, что при различном достижении некоторого состояния системы последующие решения должны принадлежать оптимальной программе для оставшейся части пути, начинающейся с этого состояния. Применение сформулированного принципа позволяет получать все используемые в динамическом программировании функциональные рекуррентные соотношения. Метод динамического программирования пригоден для решения задач синтеза оптимального управления как непрерывных, так и дискретных (многошаговых) систем. Особенностями метода являются хорошая алгоритмизуемость и возможность эффективного использования современных средств вычислительной техники.

Разобьём время пребывания на колосниковой решетке на κ частей, получив временные промежутки $\Delta\tau_\kappa$. Каждое последующее состояние системы, описанной уравнениями, полностью определяется её предыдущим состоянием и вектором управляющих параметров $\{T_{g0}, v_{g0}\}$, т. е. рассматриваемая система подчинена принципу Беллмана. Таким образом, находя оптимальные значения T_{g0}, v_{g0} последовательно на каждом временном промежутке $\Delta\tau_\kappa$, получим динамический режим, оптимизирующий целевые процессы по всей зоне обжига для обжиговой машины.

Критериями оптимизации в зоне подогрева и обжига могут служить минимум средней по слою прокалки $\bar{\eta} \to \min$ и заданная прочность $\|\sigma - \sigma^*\| \to 0$. Цена готового продукта $Ц = Q_{эл}Ц_{эл} + Q_{теп}Ц_{теп}$ в технологии обжига сырья формируется главным образом за счёт удельного расхода электрической $Q_{эл}$ и тепловой $Q_{теп}$ энергии. Причём цена электрической энергии $Ц_{эл}$ примерно в четыре раза больше тепловой $Ц_{теп}$. В условиях рыночной экономики оптимальным считается режим обжига, при котором необходимое качество готового продукта достигается при минимуме стоимости энергоносителей.

Задача оптимизации на каждом временном шаге может быть сформулирована так: найти значения управляющих параметров T_{g0}, v_{g0}, чтобы значения $\bar{\eta}$, $\|\sigma - \sigma^*\|$ и Ц достигали своего наименьшего значения, при ограничениях:

на управляющие параметры — скорость $v_{g0} \leqslant v_g^{\max}$ и температуру $T_{g0} \leqslant T_g^{\max}$ теплоносителя на входе в слой и на выходе $T_{gh} \leqslant T_{gh}^{\max}$, в силу технических особенностей агрегатов;

на скорость нагрева — $\partial T_m/\partial\tau \leqslant T_1^{\max}$ и градиент $\partial T_m/\partial x \leqslant T_2^{\max}$ температур в окатыше, а также не допустить остеклование окатыша при высокотемпературном обжиге.

Сведение многокритериальной задачи управления нагревом плотного слоя окатышей к однокритериальной минимизации в лексикографической постановке. При решении многокритериальной задачи необходимо учитывать сведения об относительной важности частных критериев. В некоторых многокритериальных задачах частные критерии строго упорядочены по важности так, что следует добиваться приращения более важного критерия за счёт любых потерь по всем остальным менее важным критериям.

Задание строго ранжированных по важности критериев K_1, K_2, ..., K_s позволяет не только выделить некоторые стратегии в качестве оптимальных, но и упорядочить все стратегии по степеням предпочтительности. Поэтому указанное отношение предпочтения часто называют лексикографическим, а многокритериальные задачи со строгоупорядоченными по важности критериями — лексикографическими задачами оптимизации.

Также существуют многокритериальные задачи, в которых все критерии можно ранжировать по важности, однако не столь жёстко, как в лексикографическом случае. Для решения подобных задач нередко применим метод последовательных уступок. Процедура решения многокритериальной задачи методом последовательных уступок заключается в том, что все

частные критерии располагают и нумеруют в порядке их относительной важности. Минимизируют первый, наиболее важный критерий, затем назначают величину допустимого отклонения значения этого критерия и минимизируют второй по важности критерий при условии, что значение первого критерия не должно отличаться от минимального более чем на величину установленного отклонения (уступки). После этого назначают величину уступки, но уже по второму критерию, и находят минимум третьего по важности критерия при условии, чтобы значения первых двух критериев не отличались от ранее найденных минимальных значений больше чем на величины соответствующих уступок. Далее подобным образом поочередно используются все остальные частные критерии. Обычно оптимальной считают любую стратегию, которая получена при решении задачи нахождения условного минимума последнего по важности критерия. Таким образом, при использовании метода последовательных уступок многокритериальная задача сводится к поочередной минимизации частных критериев и выбору величин уступок, которые характеризуют отклонение приоритета одних частных критериев перед другими от лексикографического. Чем уступки меньше, тем приоритет жёстче.

Итак, лексикографическое отношение предпочтения $\xrightarrow{lex}$ на множестве стратегий U задается векторным критерием $\{\bar{\eta}, \|\sigma - \sigma^*\|, Ц\}$. Большое теоретическое и практическое значение имеет вопрос о построении одного функционала, позволяющего представить лексикографическое отношение, т. е. функционала Ф, определённого на U и обладающего следующим свойством:

$$\forall u,\ w \in U,\ \Phi(u) \leqslant \Phi(w) \Leftrightarrow u \xrightarrow{lex} w. \quad (1)$$

Если u^* — лексикографически оптимальная стратегия, то она минимизирует обладающий свойством (1) функционал Ф, верно и обратное утверждение. Иными словами, функционал Ф, представляющий лексикографическое отношение предпочтения, достигает наименьшего значения в точности на множестве оптимальных стратегий U^*:

$$U^* = \{u\colon u \in U \ \&\ \Phi(u) = \min \Phi(w)\}. \quad (2)$$

Это означает, что если удалось построить функционал Ф, представляющий лексикографическое отношение предпочтения, то задача нахождения лексикографически оптимальных стратегий сводится к задаче нахождения минимума Ф на U.

Рассуждения, приведённые в работах [2, 3], доказывают существование искомого Ф и предлагают достаточно простой и весьма удобный для практической реализации способ построения функционала:

$$\Phi = \sum_{r=1}^{S} \alpha_r K_r. \quad (3)$$

Для построения функционала (3), линейного относительно частных критериев, необходимо выбирать коэффициенты α_r. В работе [3] доказано: для того чтобы функционал Ф обладал свойством (1), необходимо, чтобы коэффициент α_S при последнем по важности критерии K_S был положителен (конкретный выбор α_S, как это будет видно из дальнейшего, следует сделать из удобств практического применения Ф), а остальные коэффициенты назначать в соответствии с неравенством:

$$\alpha_r > \frac{1}{\mu_r} \sum_{l=r+1}^{S} \alpha_l M_l, \quad (4)$$

где $0 < \mu_r \leqslant \inf\limits_{\substack{u,w \in U \\ K_r(u) \neq K_r(w)}} |K_r(u) - K_r(w)|$.

В свою очередь,

$$M_l \geqslant \max_{u \in U} K_l(u) - \min_{u \in U} K_l(u). \quad (5)$$

Описанное построение искомого функционала, представляющего лексикографическое отношение предпочтения, легко реализуемо, так как выбрать величины μ_r и M_l сравнительно легко удаётся для каждого критерия в силу их ограниченности на ограниченном множестве допустимых стратегий, описываемом системой неравенств:

$$\begin{cases} 0 \leqslant v_{g0} \leqslant v_g^{\max} \\ 273 \leqslant T_{g0} \leqslant T_g^{\max} \\ 0 \leqslant \bar{\eta} \leqslant 1 \\ 0 \leqslant \left\|\sigma - \sigma^*\right\| \leqslant \sigma_K \\ 0 \leqslant Ц \leqslant Ц^{\max}. \end{cases} \quad (6)$$

Метод минимизации. Общая задача оптимизации параметров систем управления заключается в нахождении экстремума критерия (целевой функции) при заданных ограничениях в виде равенств или неравенств, т.е. в решении задачи математического программирования.

В исследуемой задаче функционал

$$\Phi = \alpha_2\bar{\eta} + \alpha_3\left\|\sigma - \sigma^*\right\| + \alpha_4 Ц \qquad (7)$$

представляет собой целевую функцию (критерий) с ограничениями в виде системы неравенств:

$$\begin{cases} T_{gh} \leqslant T_{gh}^{\max} \\ \dfrac{\partial T_m}{\partial \tau} \leqslant T_m^{\max} \\ \dfrac{\partial T_m}{\partial x} \leqslant T_m^{\max} \\ g \leqslant g^{\max}, \end{cases} \qquad (8)$$

где $\{T_{g0},\ v_{g0}\}$ — вектор управляющих параметров (управлений, стратегия).

Вектор $\left\{T_{g0}^*,\ v_{g0}^*\right\}$, удовлетворяющий неравенствам (6), (8) и минимизирующий функционал Ф, называется оптимальной точкой (стратегией), а соответствующее значение $\Phi\left(T_{g0}^*,\ v_{g0}^*\right)$ — оптимальным значением целевой функции. Пара $\left\{T_{g0}^*,\ v_{g0}^*\right\}$ и $\Phi\left(T_{g0}^*,\ v_{g0}^*\right)$ составляет оптимальное решение.

Для решения поставленной задачи условной оптимизации требуется применение так называемых поисковых методов, в которых направление минимизации определяется на основании последовательных вычислений критерия Ф. Основным преимуществом методов поиска является то, что они не требуют регулярности целевой функции, а также существования производных. На практике поисковые алгоритмы часто оказываются достаточно эффективными и удобными, особенно при решении на ЭВМ.

Эффективным при решении поисковых задач безусловной оптимизации является метод деформируемого многогранника, предложенный Нелдером и Мидом [4, 5]. В нём функционал Ф от двумерного вектора $\{T_{g0},\ v_{g0}\}$ минимизируется с помощью деформации специально подобранного треугольника. Деформируемый от итерации к итерации треугольник в процессе поиска адаптируется к поведению целевой функции, вытягиваясь вдоль длинных склонов, изменяя направление в изогнутых впадинах, и сжимаясь в окрестности минимума Ф.

Выполнение ограничений на управляющие параметры (скорость $0 \leqslant v_{g0} \leqslant v_g^{\max}$ и температуру $273 \leqslant T_{g0} \leqslant T_g^{\max}$) теплоносителя на входе в слой достигается введением в функционал Ф барьерных функций вида:

$$f_1 = \begin{cases} 0 \text{ при } \left\{W_g,\ T_{g0}\right\} \in \left[0; v_g^{\max}\right] \cap \left[273; T_g^{\max}\right]; \\ \infty \text{ в противном случае.} \end{cases}$$

Это ограничение является наиболее жёстким, ибо оно обеспечивает математически корректное и физически осуществимое решение задачи.

Остальные условия осуществляются методом штрафных функций типа "квадрата срезки" с введением вспомогательного аргумента, обеспечивающего одинаковый порядок величин, входящих в систему ограничений:

$$f_2 = \sum_{i=1}^{4} \beta_i\ ,$$

где $\beta_1 = \begin{cases} \left(k_1 T_{gh}\right)^2 & \text{при } T_{gh} > T_{gp}^{\max} \\ 0 & \text{при } T_{gh} \leqslant T_{gh}^{\max} \end{cases}$;

$$\beta_2 = \begin{cases} \left(k_2 \dfrac{\partial T_m}{\partial \tau}\right)^2 & \text{при } \dfrac{\partial T_m}{\partial \tau} > T_m^{\max} \\ 0 & \text{при } \dfrac{\partial T_m}{\partial \tau} \leqslant T_m^{\max} \end{cases};$$

$$\beta_3 = \begin{cases} \left(k_3 \dfrac{\partial T_m}{\partial x}\right)^2 & \text{при } \dfrac{\partial T_m}{\partial x} > T_m^{\max} \\ 0 & \text{при } \dfrac{\partial T_m}{\partial \tau} \leqslant T_m^{\max} \end{cases};$$

$$\beta_4 = \begin{cases} \left(k_6 g\right)^2 & \text{при } g > g^{\max} \\ 0 & \text{при } g \leqslant g^{\max} \end{cases}.$$

Для увеличения скорости нахождения минимума на каждом последующем временном шаге в качестве начальной точки поиска выберем найденную точку минимума на предыдущем временном шаге.

Управление технологическим процессом обжига посредством параметров $T_{g0}(\tau)$ и $v_{g0}(\tau)$ позволяет осуществлять оптимальный программируемый нагрев и, следовательно, удовлетворять необходимым технологическим требованиям.

Управление процессами прокалки и спекания. Для изучения характера процессов прокалки и спекания в плотном слое окатышей рассмотрим подачу газа-теплоносителя только с одной стороны (сверху). Будем проводить термическую обработку материала до тех пор, пока средняя по слою степень реагирования и требуемая прочность не будут достигнуты, т.е. $\bar{\eta} \leqslant 0{,}95$, $\bar{\sigma} \geqslant 125$.

В результате оптимизации получены результаты, приведённые ниже.

На первом этапе теплоноситель имеет максимально возможную температуру 1327 °С

(рис. 1). Скорость газа-теплоносителя сначала 1,1 м/с, затем принимает максимально возможное значение 1,3 м/с (рис. 2). Это связано с тем, что сначала нагреваются верхние горизонты слоя, а затем для интенсивного прогрева следующих горизонтов слоя требуется максимальная скорость теплоносителя. На следующем этапе скорость подачи газа-теплоносителя опускается до минимальной 0,2 м/с. Это связано с тем, что целевые процессы в верхних горизонтах слоя завершились и происходит рекуперация тепла в нижние слои. Скорость подачи газа-теплоносителя определяется работой эксгаустеров, потребляющих электрическую энергию, которая дороже тепловой [6]. Поэтому температура теплоносителя снижается гораздо меньше, чем его скорость. Такой режим формирует затухающую (из-за теплопоглощения на эндотермические физико-химические превращения) тепловую волну (рис. 3), которая движется вглубь слоя, интенсифицируя процессы декарбонизации (рис. 4), спекания (рис. 5.), что обеспечивает минимальную цену энергозатрат.

Реакция декарбонизации в целом по слою закончена (см. рис. 4). Получение однородного прочного по высоте слоя материала достичь не удаётся [7]. Это связано с тем, что наиболее интенсивно упрочнение проходит в достаточно узком промежутке температур. Нагреть материал в слое достаточно однородно требует больших энергетических затрат, а перегрев материала сопряжён с его остеклованием и разупрочнением.

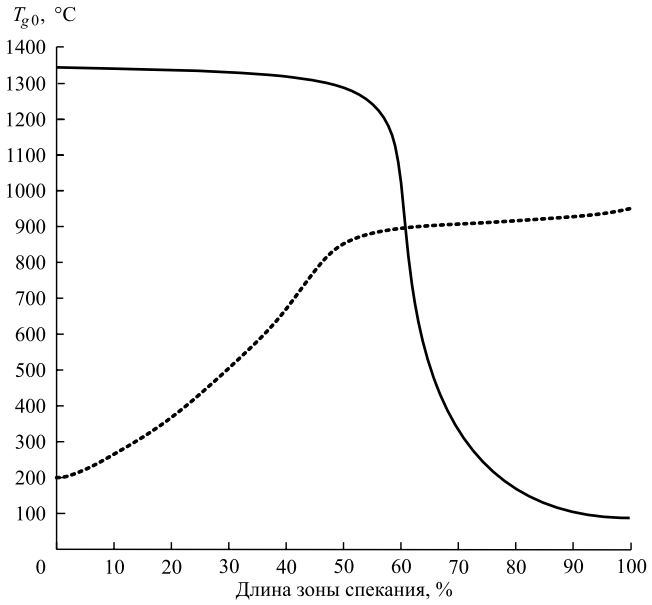


Рис. 1. Температура теплоносителя в зоне обжига:
—— на входе в слой; **---** на выходе из слоя

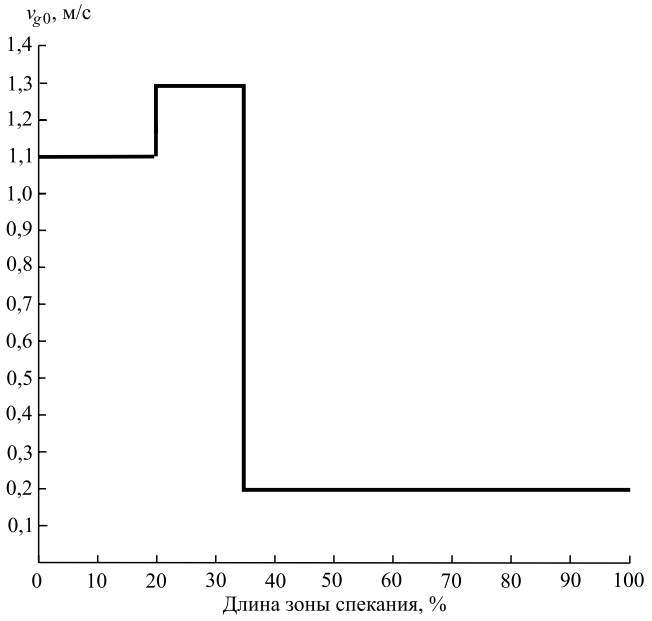


Рис. 2. Скорость подачи газа-теплоносителя в зоне обжига

Рис. 3. Температура материала в зоне обжига, °С

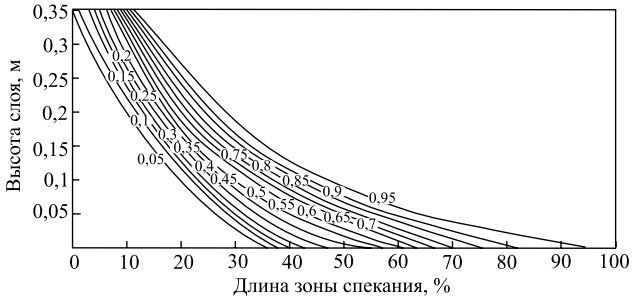


Рис. 4. Степень реагирования в зоне обжига

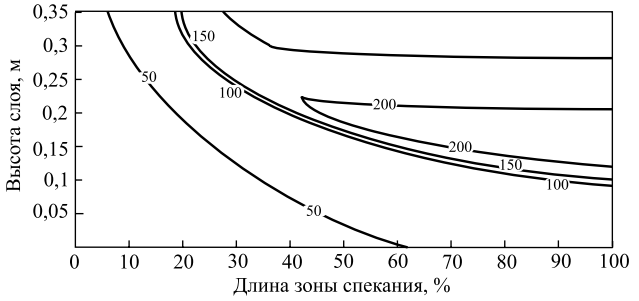


Рис. 5. Прочность материала (окатышей) в зоне обжига, кг/ок

В среднем по слою получаем удовлетворяющие требуемому качеству окатыши.

Заключение. Таким образом, проанализировав результаты, можно сделать вывод, что верхние горизонты слоя в зоне обжига достигают температуры, необходимой для успешного проведения целевых процессов несколько раньше, чем материал покидает зону. Для энергосбережения процесс рекуперации тепла от верхних нагретых горизонтов слоя внутрь можно организовать раньше. Проведя численные эксперименты установили, что оптимальным с точки зрения ресурсо- и энергосбережения и увеличения качества готового продукта является режим, при котором сужается зона интенсивного высокотемпературного нагрева и увеличивается зона рекуперации с умеренной температурой подачи теплоносителя в слой.

Полученные результаты используются при оптимизации химико-технологической системы обжига сырьевых материалов в плотном слое, на обжиговых машинах конвейерного типа, в условиях изменения химического, гранулометрического состава сырья.

Библиографические ссылки

1. **Бобков В.И.** Исследование технологических и тепло-массообменных процессов в плотном слое дисперсного материала // Тепловые процессы в технике. 2014. № 3. С. 139—144.

2. **Подиновский В.В.** Задача оценивания коэффициентов важности как симметрически-лексикографическая задача оптимизации // Автоматика и телемеханика. 2003. № 3. С. 150—162.

3. **Подиновский В.В., Гаврилов В.М.** Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М.: Советское радио, 1975. 192 с.

4. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование. М.: МИР, 1975. 534с.

5. **Болнокин В.Е., Чинаев П.И.** Анализ и синтез систем автоматического управления на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1986. 186 с.

6. **Бобков В.И.** Интенсификация процесса слоевой сушки дисперсного материала // Тепловые процессы в технике. 2014. № 9. С. 425—430.

7. **Бобков В.И., Борисов В.В., Дли М.И., Мешалкин В.П.** Моделирование процессов обжига фосфоритовых окатышей в плотном слое // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 2. С. 182—188.

УДК 621.396.6.019.3

М.А. Шалумов, канд. техн. наук, **А.С. Шалумов,** д-р техн. наук, проф.,
Н.А. Шалумова, канд. техн. наук
(Владимирский филиал РАНХиГС),
Ю.Н. Кофанов, д-р техн. наук, проф.
(Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва)

ALS140965@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИАТОРОВ

Рассмотрены вопросы автоматизации моделирования тепловых процессов печатных узлов радиоэлектронных средств с использованием радиаторов в автоматизированной подсистеме анализа конструкций печатных узлов радиоэлектронных средств на тепловые и механические воздействия АСОНИКА-ТМ.

Ключевые слова: радиоэлектронное средство; моделирование; тепловое воздействие; печатный узел; радиатор.

The modeling automation questions of thermal processes in the printing assemblies of radio-electronic means through the use of the radiators in the automated subsystem for influence analysis of the printing assemblies designs of radio electronic means on the thermal and mechanical effects ASONIKA-TM are considered.

Keywords: radio-electronic means; modeling; thermal effect; printing assembly; radiator.

Для современных радиоэлектронных средств (РЭС) характерны широкие диапазоны рабочих температур (от −60 до +85 °С). Обеспечение таких требований на стадии проектирования РЭС связано с необходимостью знания локальных значений температур на каждом электрорадиоэлементе (ЭРЭ). Так как современные РЭС имеют очень сложную структуру, то это практически возможно осуществить, лишь используя средства автоматизации про-

ектирования. Поэтому актуальной является задача машинного моделирования тепловых процессов РЭС [1, 2].

Были изучены математические модели тепловых процессов печатных узлов и математические модели тепловых процессов радиаторов, разработаны алгоритмы, с помощью которых учтены возможности охлаждения печатных узлов радиаторами, разработано и внедрено программное обеспечение, разработаны методики моделирования тепловых процессов РЭС с применением радиаторов.

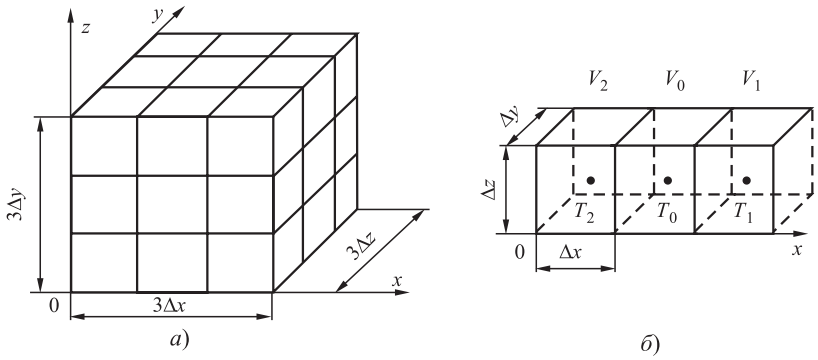


Рис. 1. Твёрдое тело, условно разбитое на элементарные объёмы ортогональными плоскостями (*а*), и выделенная совокупность элементарных объёмов вдоль оси *x* (*б*)

Математическая модель тепловых процессов (МТП) печатных узлов. Один из методов, позволяющих с достаточной точностью исследовать тепловые поля в конструкции РЭС с учётом особенностей их конструктивного построения и условий охлаждения, является метод электротепловой аналогии (ЭТА). Данный метод позволяет представить тепловые процессы, протекающие в конструкциях РЭС, в виде эквивалентной электрической цепи, которая в дальнейшем анализируется при помощи хорошо отработанного в настоящее время математического аппарата по численному анализу электрических цепей. Математически такой приём можно представить заменой дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих тепловые процессы в конструкциях, уравнениями в конечных разностях. Рассмотрим такой метод на примере дифференциального уравнения Фурье—Кирхгофа в применении к твёрдым изотропным телам при решении стационарной задачи. Такое уравнение в декартовой системе координат имеет вид

$$\lambda\nabla^2 T + q_V = 0, \qquad (1)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала изотропного твёрдого тела; q_V — удельная мощность внутренних источников энергии; T — температура; ∇ — оператор Лапласа.

Запись уравнения (1) в конечных разностях основана на допущении возможности замены непрерывного процесса дискретным, т.е.

$$\lambda\left[\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} + \frac{\Delta^2 T}{\Delta y^2} + \frac{\Delta^2 T}{\Delta z^2}\right] + q_V = 0. \qquad (2)$$

Для наглядности дальнейших рассуждений разобьём условно твёрдое тело на ряд объёмов (параллелепипедов) с размерами Δx, Δy, Δz, как показано на рис. 1, *а*. Рассмотрим совокупность элементарных объёмов в направлении оси *x*. Для этого выделим в твёрдом теле (см. рис. 1, *а*) объём V_0 и соседние с ним объёмы V_1, V_2 (рис. 1, *б*). Температуры в серединах соответствующих условно изотермических объёмов обозначим T_0, T_1, T_2.

В объёме V_0 имеются внутренние источники энергии с удельной мощностью q_0.

Тогда для объёма V_0 составляющая по оси *x* (с использованием разности вперёд) уравнения (2) примет вид:

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} = \frac{\dfrac{T_1 - T_0}{\Delta x} - \dfrac{T_0 - T_2}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{T_1 - T_0}{\Delta x^2} - \frac{T_0 - T_2}{\Delta x^2}; \qquad (3)$$

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta y^2} = \frac{T_3 - T_0}{\Delta y^2} - \frac{T_0 - T_4}{\Delta y^2}; \qquad (4)$$

$$\frac{\Delta^2 T}{\Delta z^2} = \frac{T_5 - T_0}{\Delta z^2} - \frac{T_0 - T_6}{\Delta z^2}. \qquad (5)$$

С учётом выражений (3), (4) и (5) уравнение (2) можно записать в следующем виде:

$$\lambda\left[\left(\frac{T_1 - T_0}{\Delta x^2} - \frac{T_0 - T_2}{\Delta x^2}\right) + \left(\frac{T_3 - T_0}{\Delta y^2} - \frac{T_0 - T_4}{\Delta y^2}\right) + \left(\frac{T_5 - T_0}{\Delta z^2} - \frac{T_0 - T_6}{\Delta z^2}\right)\right] + q_0 = 0. \qquad (6)$$

Умножим обе части уравнения (6) на объём параллелепипеда $V_0 = \Delta x\Delta y\Delta z$. Получим:

$$\left[\frac{\lambda\Delta y\Delta z}{\Delta x}(T_1 - T_0) - \frac{\lambda\Delta y\Delta z}{\Delta x}(T_0 - T_2)\right] + \left[\frac{\lambda\Delta x\Delta z}{\Delta y}(T_3 - T_0) - \frac{\lambda\Delta x\Delta z}{\Delta y}(T_0 - T_4)\right] + \left[\frac{\lambda\Delta x\Delta y}{\Delta z}(T_5 - T_0) - \frac{\lambda\Delta x\Delta y}{\Delta z}(T_0 - T_6)\right] + Q_0 = 0, \qquad (7)$$

где $Q_0 = q_0\Delta x\Delta y\Delta z$ — тепловая мощность, рассеиваемая в элементарном объёме V_0.

Введём обозначения:

$$G_x = \frac{\lambda \Delta y \Delta z}{\Delta x};\ G_y = \frac{\lambda \Delta x \Delta z}{\Delta y};\ G_z = \frac{\lambda \Delta x \Delta y}{\Delta z}.$$

Введённые параметры G_x, G_y, G_z имеют физический смысл и размерность (Вт/К) тепловых проводимостей между соседними элементарными объёмами твёрдого тела по осям x, y и z соответственно. Уравнение (7) с учётом введённых параметров примет вид:

$$\begin{aligned}&\left[G_x\left(T_1 - T_0\right) - G_x\left(T_0 - T_2\right)\right] + \\ &+\left[G_y\left(T_3 - T_0\right) - G_y\left(T_0 - T_4\right)\right] + \\ &+\left[G_z\left(T_5 - T_0\right) - G_z\left(T_0 - T_6\right)\right] + Q_0 = 0.\end{aligned} \tag{8}$$

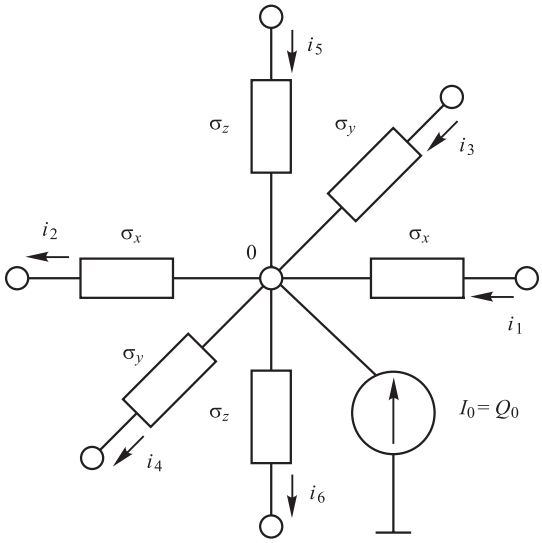


Рис. 2. Фрагмент электрической схемы, моделирующей процессы теплопередачи в элементарном объёме V_0

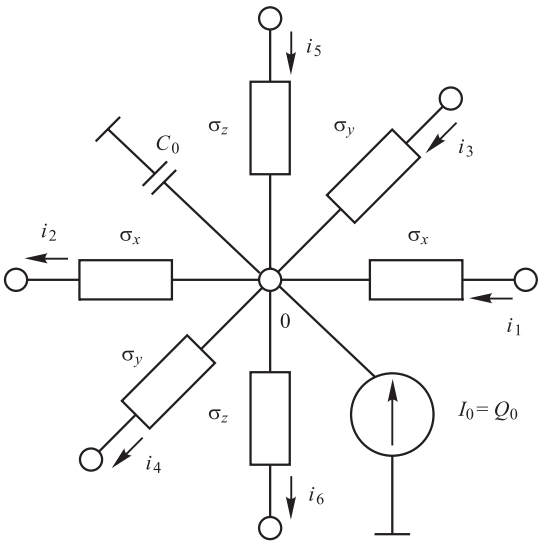


Рис. 3. Фрагмент электрической схемы, моделирующей нестационарные процессы теплопередачи через элементарный объём V_0

Конечно-разностное уравнение (8), описывающее теплообмен в элементарном объёме твёрдого тела, имеет аналогом уравнение, записанное на основе 1-го закона Кирхгофа для суммы токов нулевого узла электрической цепи, представленной на рис. 2.

При решении нестационарных задач в электрическую эквивалентную цепь вводятся конденсаторы, которые моделируют теплоёмкости соответствующих условно изотермичных объёмов конструкции РЭС. Наличие конденсаторов в схеме можно описать уравнением (1), в которое вводится компонента, т. е.

$$\lambda \nabla^2 T + q_V - C_p \rho \frac{dT}{d\tau} = 0, \tag{9}$$

где C_p — удельная теплоёмкость материала; ρ — плотность материала.

Проделав преобразования, аналогичные (6)—(8), получим:

$$\begin{aligned}&\left[G_x\left(T_1 - T_0\right) - G_x\left(T_0 - T_2\right)\right] + \\ &+\left[G_y\left(T_3 - T_0\right) - G_y\left(T_0 - T_4\right)\right] + \\ &+\left[G_z\left(T_5 - T_0\right) - G_z\left(T_0 - T_6\right)\right] - \\ &- C_0 \frac{dT_0}{d\tau} + Q_0 = 0,\end{aligned} \tag{10}$$

где C_0 — теплоёмкость объёма V_0.

Аналогом уравнения (9) будет электрическая цепь, представленная на рис. 3.

Математическая модель тепловых процессов радиаторов. Радиаторы с развитыми поверхностями для охлаждения мощных элементов РЭС являются типовыми конструктивными узлами в большинстве современных РЭС. Причём при разработке аппаратуры используются как унифицированные, так и специальные радиаторы, разрабатываемые на предприятиях с учётом конкретных особенностей конструкций аппаратуры. Наибольшее распространение получили пластинчатые (рис. 4, *а*) и игольчатые (рис. 4, *б*) радиаторы с односторонним и двусторонним оребрением.

МТП радиатора аналогична МТП печатного узла. Для учёта предусмотрена аналитическая модель вычисления параметра ветви топологической модели:

$$X_{ij}^T = \left(\alpha_л + \alpha_k\right)\left(S_n + \eta_p S_p\right), \tag{11}$$

где XT_{ij} — конвективно-лучистая теплоотдача с оребрённой (развитой) поверхности; $\alpha_л$ — коэффициент лучистой теплоотдачи.

В свою очередь,

$$\alpha_л = \varepsilon\xi f(T), \qquad (12)$$

где $f(T) = 0,567 \cdot 10^{-7}\left[\left(T_i^2 + T_j^2\right)\left(T_i + T_j\right)\right]$; T_i и T_j — температуры тел, участвующих в излучении по шкале Кельвина; ε — приведённый коэффициент черноты поверхностей тел; ξ — приведённый коэффициент облучённости оребрённой поверхности.

Приведённый коэффициент облучённости оребрённой поверхности запишется в виде:

$$\xi = D_n/(2H_р + D_n),$$

где D_n — расстояние между рёбрами (пластинами или штырями); H_p — высота рёбер (пластин или штырей); $\alpha_k = (\lambda_в Nu/L_0)(P_{ос}/760)^{0,5}K_{ор}$ — коэффициент конвективной теплоотдачи; L_0 — определяющий размер; $K_{ор}$ — коэффициент ориентации; $P_{ос}$ — давление окружающей среды; $\lambda_в$ — коэффициент теплопроводности холодоносителя (воздуха); Nu — число Нуссельта.

В свою очередь, число Грасгофа Gr запишется в виде:

$$Gr = g\beta(T_i - T_j)\, L_0^3/\nu^2,$$

где β — коэффициент объёмного расширения холодоносителя (воздуха); ν — коэффициент кинематической вязкости холодоносителя (воздуха); g — ускорение силы тяжести.

Число Нуссельта определяется по формуле:

$$Nu = 1,4\sqrt{\left(1 + 0,113Gr\frac{D_n}{2L}\right)} \text{ при } Gr\frac{D_n}{2L} < 7;$$

$$Nu = 0,5Gr\frac{D_n}{2L_р} \text{ при } 7 \leqslant Gr\frac{D_n}{2L_р} \leqslant 20;$$

$$Nu = 0,5Gr\frac{D_n}{2L_р} \text{ при } Gr\frac{D_n}{2L_р} > 20,$$

где $S_р$ — площадь рёбер; $S_п$ — площадь пазов; $\eta_р = th(mH_р)/(mH_р)$ — эффективность ребра; $m = \sqrt{\left((a_л + a_k)P_р\right)/\left(\lambda_р F_р\right)}$; $P_р$ — периметр сечения ребра; $F_р$ — площадь сечения ребра; $\lambda_р$ — коэффициент теплопроводности материала ребра.

Алгоритмы для учёта возможности охлаждения печатных узлов с помощью радиаторов. В существующую систему моделирования тепловых процессов печатных узлов добавлены ветви, моделирующие различные варианты применения радиаторов. Пользователь задаёт, какие именно варианты охлаждения с помощью радиаторов будут использованы. Параметры ветвей в соответствующем формате добавляются в МТП печатного узла.

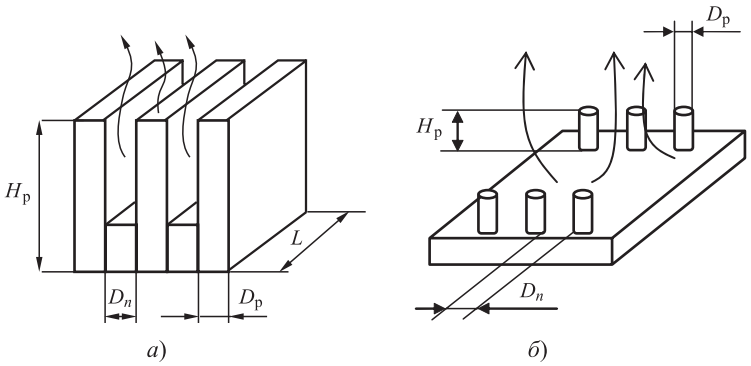


Рис. 4. Пластинчатые (*а*) и игольчатые (*б*) радиаторы

Если моделируется радиатор с пластинчатым оребрением в вакууме, то используется ветвь (теплообмен излучением с развитой поверхности с пластинчатым оребрением), имеющая следующие параметры: толщина ребра, шаг установки рёбер, высота ребра, количество рёбер, длина ребра, степень черноты поверхности.

Если моделируется радиатор с игольчато-штыревым оребрением в вакууме, то используется ветвь (теплообмен излучением с развитой поверхности с игольчато-штыревым оребрением) с параметрами: диаметр штырьков, шаг установки штырьков, высота штырьков, количество штырьков, длина оребрённой поверхности, степень черноты поверхности.

Если моделируется радиатор с пластинчатым оребрением в воздухе, то используется ветвь (конвективно-кондуктивно-лучистая теплоотдача), имеющая параметры: толщина ребра, шаг установки рёбер, высота ребра, количество рёбер, длина ребра, теплопроводность материала, степень черноты поверхности, давление окружающей среды.

Если моделируется радиатор с игольчато-штыревым оребрением в воздухе, то используется ветвь (конвективно-кондуктивно-лучистая теплоотдача) с параметрами: диаметр штырьков, шаг установки штырьков, высота штырьков, количество штырьков, длина оребрённой поверхности, теплопроводность материала, степень черноты поверхности, давление окружающей среды.

При моделировании радиатора с пластинчатым оребрением с обдувом используется ветвь (обдув развитой поверхности с пластин-

чатым оребрением), имеющая параметры: толщина ребра, шаг установки рёбер, высота ребра, количество рёбер, длина ребра, теплопроводность материала, скорость воздуха на входе в радиатор, давление окружающей среды.

Если моделируется радиатор с игольчато-штыревым оребрением с обдувом, то используется ветвь (обдув развитой поверхности с игольчато-штыревым оребрением) с параметрами: диаметр штырьков, шаг установки штырьков, высота штырьков, количество штырьков, длина оребрённой поверхности, теплопроводность материала, скорость воздуха на входе в радиатор, давление окружающей среды.

Программное обеспечение для учёта возможности охлаждения печатных узлов с помощью радиаторов. Разработано программное обеспечение, в котором учтены рассмотренные выше математические модели и алгоритмы. На рис. 5 представлено диалоговое окно для задания параметров радиатора. Предусмотрены возможности выбора типа радиатора (ребристый, штыревой), окружающей среды (воздушная, вакуум), стороны печатного узла (первая сторона, вторая сторона).

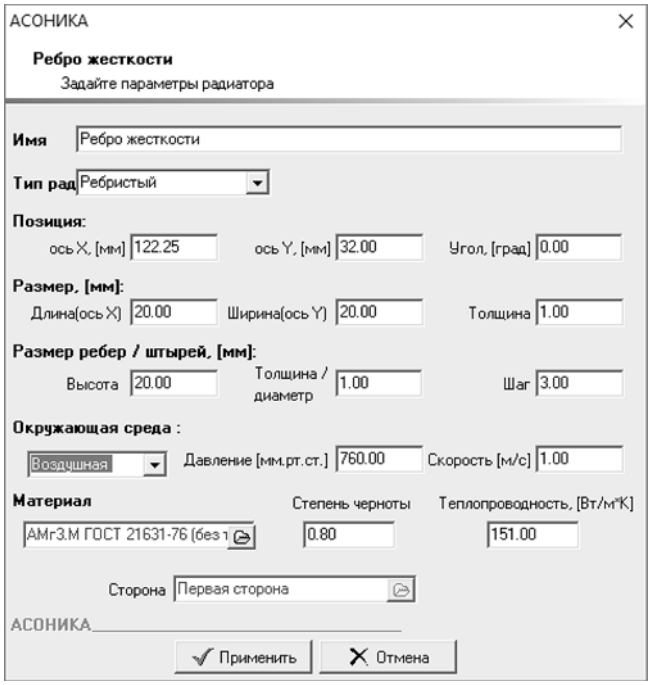


Рис. 5. Диалоговое окно для задания параметров радиатора

Методика моделирования тепловых процессов РЭС с применением радиаторов. Разработана методика моделирования тепловых процессов РЭС с применением радиаторов, на основе которой проведена серия вычислительных экспериментов, и проверены различные варианты охлаждения с помощью радиаторов.

Также проведён расчёт печатного узла на стационарное тепловое воздействие при эксплуатации в воздушной среде с температурой 20 °С. Результат расчёта представлен на рис. 6 (см. обложку).

Расчёт показал, что микросхема D19 (мощность тепловыделения 5 Вт) имеет температуру 113,83 °С, что превышает предельно допустимую по НТД (100 °С).

Для уменьшения температуры микросхемы на неё был установлен медный ребристый радиатор. Результаты расчёта показали, что температура микросхемы D19 снизилась до 108,85 °С, что также превышает предельно допустимые значения (рис. 7, см. обложку).

Применение штыревого радиатора аналогичных размеров позволило снизить температуру микросхемы D19 до 103,88 °С (рис. 8, см. обложку). Сравнение двух экспериментов показало, что штыревой радиатор для заданных условий эксплуатации позволяет снизить температуру немного эффективнее, чем ребристый.

Использование аналогичного штыревого радиатора с обдувом 1 м/с позволило снизить температуру микросхемы D19 до допустимого значения 95,1 °С (рис. 9, см. обложку).

Таким образом, были изучены МТП печатных узлов и МТП радиаторов. В результате разработаны алгоритмы и внедрено программное обеспечение. Также разработаны методики моделирования тепловых процессов РЭС с применением радиаторов и на их основе проведена серия вычислительных экспериментов.

Библиографические ссылки

1. **Автоматизированная** система АСОНИКА для проектирования высоконадёжных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий. Том 1 / Под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. 368 с.

2. **Автоматизированная** система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учетом внешних воздействий / Под ред. А.С. Шалумова. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.

УДК 519.248:658.562.012.7

В.Н. Клячкин, д-р техн. наук, проф., **Е.А. Зенцова**
(Ульяновский государственный технический университет)

v_kl@mail.ru

МОДЕЛЬ ЗАТРАТ ДЛЯ МНОГОМЕРНОЙ КОНТРОЛЬНОЙ КАРТЫ ХОТЕЛЛИНГА

Представлена модель затрат при проведении статистического контроля технологического процесса с помощью контрольной карты Хотеллинга. Получена целевая функция, которая определяет общую величину затрат в соответствии с подходом Тагути.

Ключевые слова: контрольная карта Хотеллинга; модель затрат; марковские цепи; функция потерь Тагути.

Expenditure model for statistical control process through the use of the Hotelling control card is presented. Purpose-oriented function, which determines the total expenditure value in accordance with the Taguchi approach is received.

Keywords: Hotelling control card; expenditure model; Markov chains; Taguchi loss function.

Одним из методов анализа работоспособности и эффективности исследуемого производственного процесса является использование контрольных карт, визуализирующих его статистические характеристики. Построение контрольных карт направлено на подтверждение или отклонение гипотезы о стабильности и контролируемости процесса [1, 2].

Применение контрольных карт связано с определёнными экономическими затратами. Среди них можно выделить затраты на поиск причин разладки и корректировку процесса, на обработку результатов наблюдений, а также на производство несоответствующих единиц продукции при возмущённом состоянии процесса [3, 4]. Поиск путей снижения затрат на обеспечение качества приводит к необходимости оптимизации параметров контрольных карт. Для одномерных карт этот вопрос изучен достаточно хорошо. Для многомерных карт, которые в ряде случаев оказываются эффективнее одномерных, вопрос оптимизации параметров остается открытым.

Многомерная карта Хотеллинга. Качество изготавливаемого изделия в большинстве случаев определяется множеством показателей. По результатам предварительного анализа процесса изготовления их подразделяют на группы отдельных (некоррелированных) и коррелированных внутри группы показателей: для первых используются методы одномерного контроля, для вторых — многомерного. Мониторинг последних, как правило, осуществляют с помощью карты Хотеллинга. Она является многомерным обобщением карты Шухарта и предназначена для проверки гипотезы о том, что средний уровень процесса соответствует заданным спецификациям, т.е. проверяется стабильность процесса по среднему уровню.

Для построения этой карты через определённые промежутки времени проводятся по n наблюдений за каждым из p коррелированных показателей и для каждой t-й мгновенной выборки рассчитывается статистика Хотеллинга [5, 6]:

$$T^2 = n\left(\bar{X} - \mu_0\right)^{\mathrm{T}} S^{-1}\left(\bar{X} - \mu_0\right), \qquad (1)$$

где n — объём мгновенной выборки; $\bar{X}$ — вектор средних в мгновенных выборках, $\bar{X} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} X_i$, X_i — i-е значение в t-й мгновенной выборке; μ_0 — вектор целевых средних, в управляемом состоянии, $\mu_0 = \mu = \left(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \ldots, \mu_{x_p}\right)^{\mathrm{T}}$; S — выборочная оценка ковариационной матрицы Σ размерности $p \times p$, которая рассчитывается по формуле

$$S = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(X_i - \bar{X}\right)\left(X_i - \bar{X}\right)^{\mathrm{T}}. \qquad (2)$$

Для обеспечения стабильности по среднему уровню процесса полученные значения не должны превышать критического $T^2_{\text{кр}}$, которое при известной ковариационной матрице определяется квантилью χ^2-распределения: $T^2_{\text{кр}} = \chi^2_{1-\alpha}(p-1)$ с $p-1$ степенями свободы порядка $1-\alpha$; α — вероятность ложной тревоги (вероятность ошибки первого рода) при многомерном контроле, определяющая положение контрольной границы карты. Если же ковариа-

ционная матрица неизвестна и оценивается по формуле (2), то $T^2_{\text{кр}} = p(n-1)F_{1-\alpha}(p, n-p)/(n-p)$, где $F_{1-\alpha}(p, n-p)$ — квантиль распределения Фишера с числами степеней свободы в числителе p, в знаменателе $n-p$.

Оценка затрат при использовании карты Хотеллинга. Проектирование контрольных карт заключается в определении необходимого объёма выборки n, периодичности взятия выборок (характеризуется величиной k — числом единиц продукции, произведённых между моментами взятия выборок) и положения контрольных границ $T^2_{\text{кр}}$ (или вероятности ошибки первого рода α). При этом требуется минимизировать время, необходимое для обнаружения момента разладки процесса, и затраты на проведение контроля [7].

Построение модели затрат карты Хотеллинга осуществляется на основе ряда предположений о производственном процессе. Пусть в стабильном состоянии среднее значение уровня настройки процесса равно μ_0 и имеется неслучайная причина изменчивости процесса, при появлении которой происходит смещение среднего уровня настройки процесса на величину δ ($\mu_1 = \mu_0 + \delta$). Длительность нахождения процесса в возмущённом состоянии подчиняется экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 1/T_{\text{ср}}$, где $T_{\text{ср}}$ — средняя продолжительность периода разладки процесса.

При производстве единицы продукции средние затраты, связанные с проведением процедуры контроля, $E(C)$ включают три компонента [3]:

$E(C_1)$ — затраты на обработку результатов выборочных наблюдений. Затраты $E(C_1)$ состоят из фиксированной части a_1 и переменной части a_2, зависящей от объёма выборки;

$E(C_2)$ — затраты на выявление неслучайной причины и корректировку процесса a_3;

$E(C_3)$ — затраты на производство единиц продукции несоответствующего качества. Стоимость производства единицы продукции несоответствующего качества обозначают a_4.

Для оценки затрат $E(C)$ используют выражение

$$E(C) = (a_1 + a_2 n)/k + (a_3/k)\rho^{\text{т}}\beta + a_4\phi^{\text{т}}\gamma, \quad (3)$$

где n — объём выборки; k — число единиц продукции, произведённых с момента взятия предыдущей выборки; ρ — вектор условных вероятностей ρ_i появления сигнала ложной тревоги и обнаружения разладки процесса; β — вектор вероятности нахождения процесса в стабильном β_0 или возмущённом β_1 состоянии в момент взятия выборки; ϕ — вектор условных вероятностей ϕ_i производства продукции несоответствующего качества при стабильном и возмущённом состояниях процесса; γ — вектор вероятностей γ_i нахождения процесса в стабильном и возмущённом состояниях в любой момент времени.

Для определения векторов ϕ, ρ, β и γ рассматривают два вектора: l и u значений границ допусков для p исследуемых характеристик качества. Вектор l определяет нижние границы допуска, вектор u — верхние. Пусть вектор X представляет собой вектор p исследуемых характеристик качества выпускаемой продукции и имеет p-мерное нормальное распределение вероятностей. Если хотя бы одно из значений вектора X лежит вне соответствующих границ допуска (u и l), то изделие считается дефектным.

Элементами вектора ϕ являются условные вероятности выпуска дефектной продукции при нахождении процесса в стабильном и возмущенном состояниях, и их значения определяются на основе распределения вероятностей вектора X. Параметры распределения μ и Σ в большинстве случаев неизвестны, но могут быть оценены на основе $\bar{X}$ и S. Таким образом, условные вероятности ϕ_0 и ϕ_1 могут быть найдены так [8]:

$$\phi_0 = 1 - \int_{l_1}^{u_1}\int_{l_2}^{u_2}\ldots\int_{l_p}^{u_p} B \times \exp\left\{-\frac{1}{2}(X-\mu_0)^{\text{т}} S^{-1}(X-\mu_0)\right\} dx_1 dx_2 \ldots dx_p, \quad (4)$$

$$\phi_1 = 1 - \int_{l_1}^{u_1}\int_{l_2}^{u_2}\ldots\int_{l_p}^{u_p} B \times \exp\left\{-\frac{1}{2}(X-\mu_1)^{\text{т}} S^{-1}(X-\mu_1)\right\} dx_1 dx_2 \ldots dx_p, \quad (5)$$

где

$$B = [(2\pi)^{p/2}|S|^{1/2}]^{-1}. \quad (6)$$

Вектор ρ представляет собой вектор вероятности получения сигнала о разладке при стабильном или возмущённом состоянии процесса. Элементы этого вектора можно оценить так:

$$\rho_0 = P\left\{T^2 > T^2_{\text{кр}}\right\} = \int_{T^2_{\text{кр}}}^{\infty} f\left(T^2\right) dT^2, \quad (7)$$

$$\rho_1 = P\left\{T^{2'} > T^2_{\text{кр}}\right\} = \int\limits_{T^2_{\text{кр}}}^{\infty} f\left(T^{2'}\right) dT^{2'}, \qquad (8)$$

где $f(T^2)$ — плотность распределения Хотеллинга с p и $n - p$ степенями свободы; $f(T^{2'})$ — плотность нецентрального распределения Хотеллинга с p и $n - p$ степенями свободы и параметром нецентральности $n(\mu_1 - \mu_0)^{\text{т}} S^{-1}(\mu_1 - \mu_0)$ [9].

Элементами вектора β являются вероятности нахождения процесса в стабильном и возмущённом состояниях в момент взятия выборки. Для получения значений вероятностей рассмотрим матрицу G вероятностей перехода. Она состоит из элементов, характеризующих вероятности изменения состояния технологического процесса в течение производства k единиц продукции. Вероятность нахождения процесса в стабильном состоянии в течение t часов рассчитывается по формуле

$$1 - \int\limits_0^t \lambda e^{-\lambda z} dz = 1 - \lambda\left[-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda z}\right]_0^t =$$
$$= 1 - \lambda\left[-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} + \frac{1}{\lambda}\right] = 1 - \left[1 - e^{-\lambda t}\right] = e^{-\lambda t}. \qquad (9)$$

Пусть за час производится R единиц продукции, в том числе и дефектных, тогда вероятность нахождения процесса в стабильном состоянии при производстве k единиц продукции

$$P_0 = \exp\left(\frac{-\lambda k}{R}\right), \qquad (10)$$

в возмущённом состоянии —

$$P_1 = 1 - \exp\left(\frac{-\lambda k}{R}\right). \qquad (11)$$

Тогда

$$G = \begin{bmatrix} g_{00} & g_{01} \\ g_{10} & g_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 & P_1 \\ \rho_1 P_0 & \rho_1 P_1 + (1 - \rho_1) \end{bmatrix}, \qquad (12)$$

где ρ_1 — вероятность обнаружения смещения среднего процесса при взятии m-й выборки.

Поскольку матрица G является матрицей перехода неприводимой и апериодической цепи Маркова [10], значения элементов вектора β рассчитываются следующим образом:

$$\beta_0 = \frac{\rho_1 P_0}{P_1 + \rho_1 P_0}, \qquad (13)$$

$$\beta_1 = \frac{P_1}{P_1 + \rho_1 P_0}. \qquad (14)$$

Элементами вектора γ являются вероятности нахождения процесса в стабильном и возмущённом состояниях в любой момент времени. Согласно Дункану [3], если смещение среднего уровня настройки процесса произошло в интервале между взятием m и $m + 1$ выборок, то условная вероятность Δ появления неслучайной причины нарушения процесса внутри интервала между моментами взятия выборок определяется выражением

$$\Delta = \frac{1 - \left(1 + \frac{\lambda k}{R}\right)\exp\left(-\frac{\lambda k}{R}\right)}{\left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda k}{R}\right)\right]\frac{\lambda k}{R}}. \qquad (15)$$

Тогда условные вероятности нахождения процесса в стабильном γ_0 и возмущённом γ_1 состояниях в любой момент времени определяются по формулам

$$\gamma_0 = \beta_0 P_0 + \Delta\beta_0 P_1, \qquad (16)$$

$$\gamma_1 = \beta_1 P_0 + (1 - \Delta)\beta_0 P_1. \qquad (17)$$

Интеграция функции потерь Тагути. Для построения модели затрат может быть применён подход Тагути [11, 12]. Согласно этому подходу при любом отклонении контролируемой характеристики от целевого значения происходят некоторые потери, которые зависят от величины отклонения. Таким образом, потери возникают всегда, когда характеристики изделия отличаются от заданных, даже если они при этом не выходят за границы поля допуска. Функцию потерь Тагути определяют следующим образом:

$$L(x) = K(x - c)^2, \qquad (18)$$

где $L(x)$ — потери, вызванные отклонением исследуемого показателя качества x от целевого значения c; K — константа, определяемая значением границ допуска.

В статье [13] функция Тагути обобщена на многомерный случай:

$$L\left(x_1, x_2, \ldots, x_p\right) =$$
$$= \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{i} K_{ij}\left(x_i - c_i\right)\left(x_j - c_j\right), \qquad (19)$$

где c_i — целевое значение i-го показателя качества.

Ожидаемые потери, или среднее значение многомерной функции потерь $E(L)$, может быть определено так:

$$E\left[L\left(x_1, x_2, \ldots, x_p\right)\right] = \\ = \sum_{i=1}^{p} K_{ii}\left[\left(\mu_{x_i} - c_i\right)^2 + \sigma_i^2\right] + \\ + \sum_{i=2}^{p}\sum_{j=1}^{i-1} K_{ij}\left[\left(\mu_{x_i} - c_i\right)\left(\mu_{x_j} - c_j\right) + \sigma_{ij}\right], \quad (20)$$

где μ_{x_i} и σ_i^2 — среднее значение и дисперсия исследуемого показателя качества; σ_{ij} — ковариация между x_i и x_j.

Объединяя выражения (3) и (20), получим общую формулу для затрат (ATL), которая включает затраты на взятие выборки и обработку результатов выборочных наблюдений и затраты, связанные с отклонением значений показателя качества от целевого значения:

$$ATL = \frac{a_1 + a_2 n}{k} + \frac{a_3 \sum_{i=0}^{2} \rho_i \beta_i}{k} + \\ + \left(a_4 - a_5\right)\sum_{i=0}^{2} \delta_i \gamma_i - a_5, \quad (21)$$

где

$$a_5 = E[L(x_1, x_2, \ldots, x_p)] - a_4. \quad (22)$$

Таким образом, получена целевая функция — модель затрат (21), зависящая от параметров контрольной карты Хотеллинга и характеристик производственного процесса. Минимизируя эту функцию, можно получить оптимальные значения параметров контроля: объёма выборки n, числа единиц продукции k, произведённых между моментами взятия выборок (характеризует периодичность взятия выборок), и положения контрольных границ $T_{\text{кр}}^2$. Задача решается с помощью итерационных методов либо эвристических алгоритмов, в частности генетических алгоритмов поиска.

Исследование выполнено в рамках государственного задания № 2014/232 на выполнение работ в сфере научной деятельности Минобрнауки России и при финансовой поддержке РФФИ, проект № 15-48-02038.

Библиографические ссылки

1. **Клячкин В.Н.** Статистические методы в управлении качеством: компьютерные технологии. М.: Финансы и статистика, ИНФРА-М, 2009. 304 с.

2. **Клячкин В.Н.** Модели и методы статистического контроля многопараметрического технологического процесса. М.: Физматлит, 2011. 196 с.

3. **Montgomery D.C.** Introduction to statistical quality control. New York: John Wiley and Sons, 2009. 754 p.

4. **Миттаг Х.-Й., Ринне Х.** Статистические методы обеспечения качества / Пер. с нем. М.: Машиностроение, 1995. 602 с.

5. **Клячкин В.Н., Михеев А.Ю.** Идентификация режима статистического контроля многопараметрического технологического процесса // Автоматизация и современные технологии. 2011. № 12. С. 27—31.

6. **Клячкин В.Н., Кравцов Ю.А.** Повышение эффективности статистического контроля многопараметрического технологического процесса на основе карты Хотеллинга с предупреждающей границей // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 10. С. 35—37.

7. **Зенцова Е.А.** Экономическая модель многомерной контрольной карты Хотеллинга // Информатика и вычислительная техника: сб. трудов 6-й Всероссийской науч.-техн. конф. аспирантов, студентов и молодых ученых. Ульяновск, УлГТУ, 2015. С. 215—220.

8. **Bahiraee E., Raissi S.** Economic Design of Hotelling's T^2 Control Chart on the Presence of Fixed Sampling Rate and Exponentially Assignable Causes // Journal of Industrial Engineering International. 2014. Vol. 10. P. 229—238.

9. **Вероятность** и математическая статистика: Энциклопедия / гл. ред. Ю.В. Прохоров. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. 910 с.

10. **Феллер В.** Введение в теорию вероятностей и ее приложения. В 2-х т. Т. 1 / Пер. с англ. М.: Мир, 1984. 528 с.

11. **Chou C.Y., Liu H.R., Chen C.H., Huang X.R.** Economic-statistical Design of Multivariate Control Charts Using Quality Loss Function // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2002. Vol. 20. P. 916—924.

12. **Управление** качеством. Робастное проектирование. Метод Тагути / Пер. с англ.; под ред. А.М. Талалая. М.: СЕЙФИ, 2002. 384 с.

13. **Kapur K.C., Chao B.R.** Economic Design of the Specification Region for Multiple Characteristics // IIE Transactions. 1996. Vol. 28. P. 237—248.

УДК 620.181

Н.Г. Филиппенко, кан. техн. наук, доц., **Д.В. Буторин, А.В. Лившиц,** д-р техн. наук, доц.
(Иркутский государственный университет путей сообщений)

den_butorin@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ И РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Для организации процесса управления механическими и электрофизическими свойствами изделий из полимерных материалов разработан способ определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах, заключающийся в медленном линейном (монотонном) разогреве полимерного образца контактным способом с постоянным контролем теплового расширения и периодической подачей на образец ВЧ-энергии для определения динамики коэффициента диэлектрических потерь. Линейный разогрев реализован за счёт пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования.

Ключевые слова: полимеры; фазовые превращения; релаксационные превращения; термическая обработка; ВЧ-обработка; ПИД-регулятор.

A method of determining the phase and relaxation transformations in polymeric materials is developed for management process organization of the mechanical and electro-physical properties of articles from polymer materials. The method consist in a contact slow linear (monotonic) heating a polymer sample with a constant control of thermal expansion and the alternate input to sample the HF-energy to determine dynamics of the dielectric loss index. Linear heating is realized at the expense of proportional-integral-differential adjiustment law.

Keywords: polymers; phase transformations; relaxation conversion; heat treatment; HF-treatment; PID controller.

Введение. На сегодняшний день полимерные материалы являются широко используемыми современными конструкционными материалами, получившими распространение благодаря своим уникальным свойствам: стойкости к коррозии; высокой степени устойчивости к различным видам механических и химических воздействий; возможности работы в агрессивных средах; хорошему поглощению звука и вибрации. Кроме того, они обладают электро- и теплоизоляционными свойствами.

При разработке технологического процесса изготовления любого изделия технолог решает ряд задач, одной из которых является получение изделия с заданными эксплуатационными свойствами. В отношении металлов и конструкционных материалов данная задача не вызывает существенных трудностей, поскольку на сегодняшний день свойства и возможности данного класса материалов раскрыты достаточно полно, чего нельзя сказать о полимерах, свойства которых определяются их надмолекулярными структурами. Механические свойства полимеров зависят от условий структурообразования и могут быть достаточно изменены [1].

Поэтому актуально изучение процесса структурных превращений, происходящих в полимерах, так как это необходимо для организации управления механическими и электрофизическими свойствами изделий из полимерных материалов.

Одним из наиболее доступных в машиностроении методов управления механическими свойствами полимеров является термическая обработка.

Постановка цели и задач исследования. В связи с этим цель данных исследований — изучение структурных превращений в полимерных материалах в процессе их термообработки. Достижение поставленной цели возможно после решения ряда задач:

выбора способов и режимов термической обработки полимеров;

выбора контролируемых параметров процесса нагрева полимерных материалов;

разработки способа определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах;

выбора способа линейного разогрева полимерного образца;

апробации разработанного способа и анализа результатов.

Выбор способов и режимов термической обработки полимеров. Режим термообработки характеризуют максимальная температура t_{max}, до которой был нагрет полимерный материал при термообработке, время выдержки материала τ при этой температуре, скорость нагрева $v_н$ и скорость охлаждения $v_о$ материала [1, 2].

Применительно к полимерным материалам различают четыре вида термообработки: закалку, отжиг, нормализацию, отпуск [2].

Нагрев традиционными способами (конвективный, контактный) весьма длительный и энергозатратный процесс. Анализ современных способов нагрева показывает, что наиболее эффективным является диэлектрический поляризационный нагрев, т.е. нагрев диэлектрических материалов переменным электрическим полем. Примером такого способа нагрева являются высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) печи.

В связи с этим способ диэлектрического нагрева — предмет научных исследований многих учёных, большая часть работ которых направлена на разработку технологических процессов электротермической обработки полимерных материалов (сварка, сушка, термическая обработка, диагностика, восстановление) [3—5].

Различают ВЧ и СВЧ диэлектрический нагрев. На рис. 1 представлена схема воздействия ВЧ- и СВЧ-энергии.

Обзор проведённых теоретических и экспериментальных исследований показал, что наиболее предпочтительным является нагрев полимеров диапазоном частот ВЧ-излучения, которое имеет ряд преимуществ перед СВЧ, конвективным и контактным способами нагрева: равномерность; интенсивность; избирательность; саморегулируемость; тепловая безинерционность; простота подвода ВЧ-энергии к электродам (кабельная линия); обработка изделий любой формы и размеров; возможность контроля качества обработки; линейность потока ВЧ-энергии (при СВЧ поток хаотичен); возможность создания автоматизированной системы управления (АСУ) процессом обработки.

Таким образом, в рамках настоящего исследования выбран способ и наиболее эффективный частотный диапазон диэлектрического нагрева.

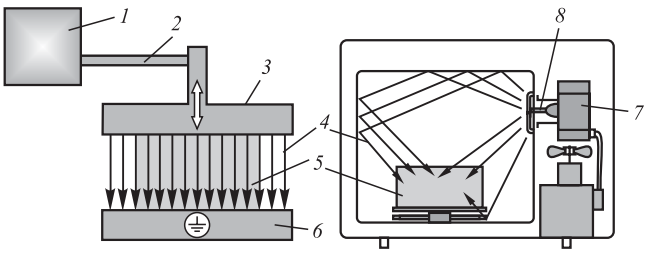


Рис. 1. Схема воздействия ВЧ- и СВЧ-энергии:
1 — ВЧ-генератор; *2* — коаксиальная линия передачи ВЧ-энергии; *3* — подвижная высокопотенциальная плита рабочего конденсатора; *4* — волны электромагнитного излучения; *5* — нагреваемое тело; *6* — нижняя заземляющая плита рабочего конденсатора; *7* — СВЧ-генератор (магнетрон); *8* — СВЧ-волновод

Выбор контролируемых параметров процесса нагрева полимерных материалов. Управление процессом электротермической обработки полимерных материалов — задача, от решения которой зависит качество обработки. Измерение параметров обрабатываемых диэлектрических материалов непосредственно в зоне ВЧ-воздействия — это затратная и технически сложная задача.

Ряд отечественных и зарубежных исследователей [6] видят решение данной задачи в организации контроля процесса ВЧ-воздействия по электрофизическим параметрам работы электротермического оборудования (анодный ток, напряжение на рабочем конденсаторе), времени ВЧ-обработки и расчётно-справочной температуре плавления полимера.

Литературный обзор показывает, что все эти методы основаны на примерном расчёте температуры плавления в зависимости от времени и мощности воздействия излучения. Поэтому процесс разогрева, а соответственно, и управление мощностью электротермического воздействия организованы на прогнозируемой температуре, определяемой по параметрам работы ВЧ-генератора. При этом вводится большое количество допущений, касающихся однородности структуры обрабатываемого материала, постоянства электрофизических параметров полимеров в процессе разогрева и др. Тем самым, практическая значимость данных разработок определена узкими рамками лабораторных условий [3].

В работе [3], согласно зависимостям (1, 2), доказано и экспериментально подтверждено, что изменение фазового состояния обрабатываемого материала можно проследить по динамике изменения фактора диэлектрических потерь $\varepsilon'' = f(T)$:

$$I_{\text{а}} = \frac{4\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''(T) E U_{\text{р}} ab}{\gamma d}; \qquad (1)$$

$$I_{\text{а}} = k(\varepsilon''(T)), \qquad (2)$$

где f — частота ЭМ-поля; $\varepsilon_{\text{о}}$ — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (воздуха); $\varepsilon''(T)$ — фактор диэлектрических потерь; E — напряжённость электрического поля; $U_{\text{р}}$ — напряжение рабочего конденсатора; a и b — геометрические параметры пластины рабочего конденсатора (длина и ширина); γ — коэффициент отражения; d — расстояние между обкладками конденсатора.

Отсюда, в соответствии с зависимостью (2), контроль фазового состояния полимерного материала в процессе ВЧ-обработки можно осуществлять по единственному параметру работы ВЧ-оборудования — анодному току $I_{\text{а}}$.

Остаётся неоднозначным соответствие фазовых превращений в полимерных материалах динамике коэффициента диэлектрических потерь. В работе [3] утверждается, что фазовый переход первого рода (состояние плавления) соответствует второму температурному максимуму фактора диэлектрических потерь, а в работе [4] состояние плавления полимера определено в первом температурном минимуме. Следовательно, для корректного контроля фазовых превращений в полимерных материалах в процессе нагрева одного показателя $I_а$ (анодного тока) недостаточно.

В связи с этим в результате исследований для контроля электротермической обработки полимеров были применены амперометрический и термомеханический (на основе прибора Фишера — Джонса) способы, что позволило обеспечить объективное определение момента достижения образцом температуры плавления и сопоставление её с динамикой изменяющегося в процессе нагрева коэффициента диэлектрических потерь.

Исходя из изложенного выше, в качестве контролируемых параметров были выбраны анодный ток $I_а$ и тепловое расширение.

Данное комплексирование методов позволило значительно упростить способы контроля, используя при этом уже готовые методики расчёта результатов, что обеспечило высокую сходимость расчётных и практических данных.

Разработка способа определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах. Для решения задачи определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах разработан способ исследований, заключающийся в линейном разогреве полимерного образца контактным способом с постоянным контролем теплового расширения объекта исследования и периодической подачей на рабочий конденсатор ВЧ-энергии для определения динамики коэффициента диэлектрических потерь.

Разработанный способ реализован на автоматизированной экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 2.

Принцип работы установки заключается в следующем. Образец из полимерного материала *1* помещается между электродами *2* плоскопараллельного рабочего конденсатора, подключенного к ВЧ-генератору *3*. Нижний электрод является электрическим нагревательным элементом *5*, обеспечивающим линейный нагрев образца до необходимой температуры с заданной скоростью. В приспособлении *4* имеется отверстие, заполненное термопроводящей пастой с термопарой *6* для контроля

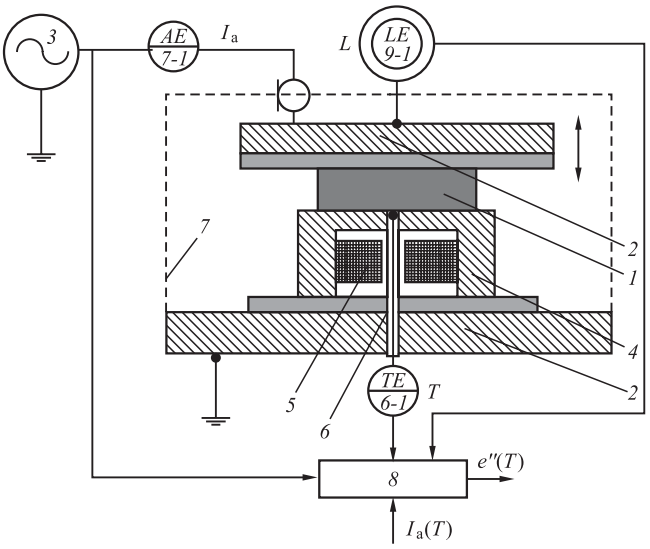


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

поверхностной температуры исследуемого образца. Анодный ток $I_а$ на рабочем конденсаторе измеряется автоматически после включения ВЧ-генератора датчиком тока (амперметра) *7-1*. Температура образца контролируется непрерывно с помощью термопары-термометра *6-1*, выходные сигналы от которой, так же как и с датчика тока, поступают на вход вычислительного блока *8*, в качестве которого используется микроконтроллер, связанный с персональным компьютером через COM-порт. Для объективного контроля момента достижения образцом температуры плавления к механизму верхней подвижной плиты рабочего конденсатора присоединён разработанный в рамках исследования датчик теплового расширения *9-1*, работающий по принципу эффекта Холла. Выходные сигналы с датчика теплового расширения поступают в вычислительный блок *8*. Защита обслуживающего персонала обеспечивается защитным экраном *7*.

Данная установка и разработанный способ позволили контролировать и идентифицировать динамику коэффициента диэлектрических потерь по показателям анодного тока и линейного теплового расширения.

Выбор способа линейного (равномерного) разогрева полимерного образца. Одна из задач при разработке способа определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах заключалась в организации линейного разогрева образца.

Наиболее простой закон регулирования температуры — позиционный. При этом методе на нагреватель подаётся полная мощность до достижения заданного значения температуры, после чего подача мощности прекращается.

Несмотря на это, разогретый нагреватель продолжает отдавать тепло и температура объекта какое-то время продолжает нарастать, что приводит к перегреву, иногда значительному. При последующем остывании объекта по достижении заданного значения температуры на нагреватель вновь подаётся полная мощность. Нагреватель сначала разогревается, затем нагреваются окружающие области объекта, и, таким образом, охлаждение будет продолжаться до тех пор, пока волна тепла не достигнет датчика температуры. Следовательно, реальная температура может оказаться значительно ниже заданного значения. Таким образом, при позиционном законе регулирования возможны значительные колебания температуры около заданного значения [7].

Это явление можно уменьшить или даже устранить, применяя пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования (ПИД-закон). ПИД предполагает уменьшение мощности, подаваемой на нагреватель, по мере приближения температуры объекта к заданной температуре. Кроме того, в установившемся режиме регулирования по ПИД-закону находится величина тепловой мощности, необходимой для компенсации тепловых потерь и поддержания заданной температуры [7].

Поэтому в качестве поддержания линейного разогрева полимерного образца был выбран ПИД-метод. При этом мощность N, которая должна выделяться нагревателем, выраженная в процентах от его максимальной мощности, запишется в виде

$$N = \frac{1000}{K_p}\left(\Delta T + \frac{1}{K_i}\int_0^1 \Delta T dt - K_d \frac{dT}{dt}\right), \quad (3)$$

где K_p, K_i, K_d — пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты регулирования (ПИД-коэффициенты).

Процесс настройки ПИД-регулятора состоит из задания уставки и значений указанных выше трёх коэффициентов. Поиск коэффициентов осуществлялся эмпирически.

Апробация разработанного способа и анализ результатов. Согласно разработанному способу на ВЧ-оборудовании модели УЗП 2500 были проведены исследования взаимосвязей электрофизических параметров электротермического оборудования и таких полимерных материалов, как: поливинилхлорид ОМБ-60, полиамид ПА6, стеклонаполненный полиамид (армамид ПА СВ 30-1 ЭТМ).

Размеры образцов подбирались согласно условию максимальной эффективности обработки на ВЧ-установке модели УЗП 2500, что соответствует площади образца в 125 см^2. Натурные испытания не были ограничены размерами, соответствующими максимальной мощности ВЧ-генератора. Дополнительно проведён ряд экспериментов с образцами других размеров.

Полученные экспериментальные данные позволили построить зависимости теплового расширения образца от температуры $\Delta l = f(T)$. Данные зависимости представлены на рис. 3—5. Анализ данных теплового расширения и анодного тока показал, что изменение фазового состояния (начало плавления) соответствует первому минимуму значений анодного тока, как и утверждалось в работе [3].

Состояние первого максимума анодного тока было идентифицировано как момент распада сегментальной подвижности полярных групп.

Также впервые определены скорости изменения анодного тока от температуры $dI_а = f(dT)$ (см. рис. 3, *б*; 4, *б*; 5, *б*). Производные определялись методом левой конечной разности первого порядка аппроксимации:

$$\frac{dI_а}{dT} = \frac{I_{а_m} - I_{а_{m-1}}}{T_m - T_{m-1}}. \quad (4)$$

Дифференцирование позволило контролировать соответствие текущего значения $I_а$ экстремумам зависимости tgδ = $f(T)$ при достижении $dI_а/dT$ нулевого значения.

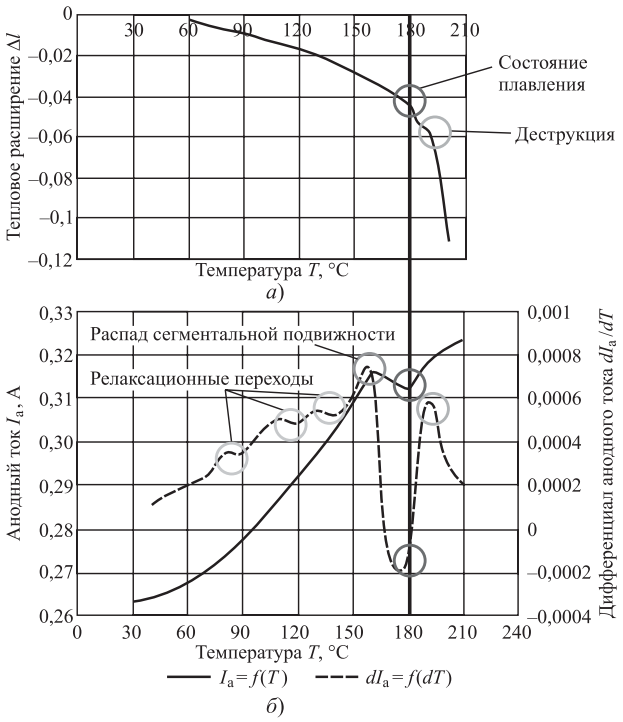


Рис. 3. Экспериментальные кривые:
а — $\Delta l = f(T)$; *б* — $I_а = f(T)$ и $dI_а = f(dT)$ (материал ПВХ ОМБ-60)

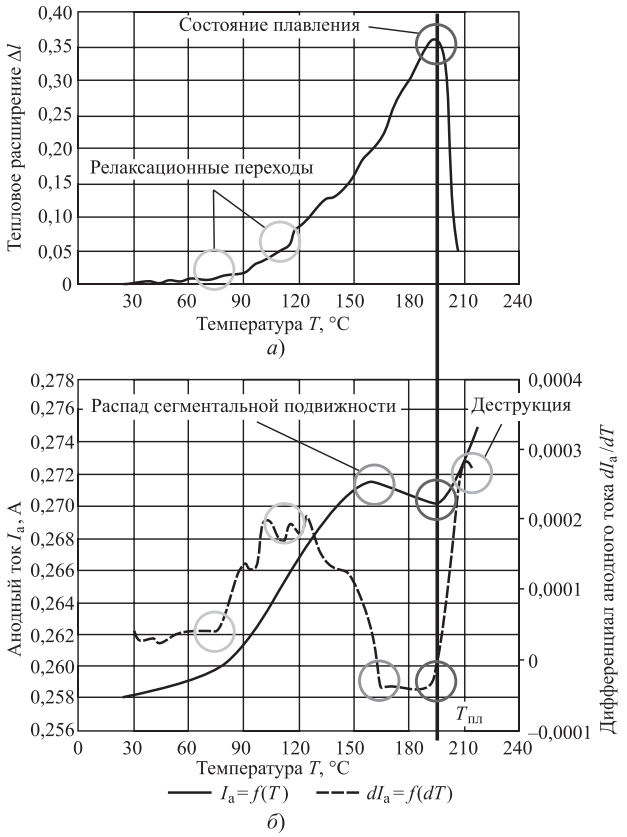


Рис. 4. Экспериментальные кривые:
а — $\Delta l = f(T)$; *б* — $I_а = f(T)$ и $dI_а = f(dT)$ (материал Армамид)

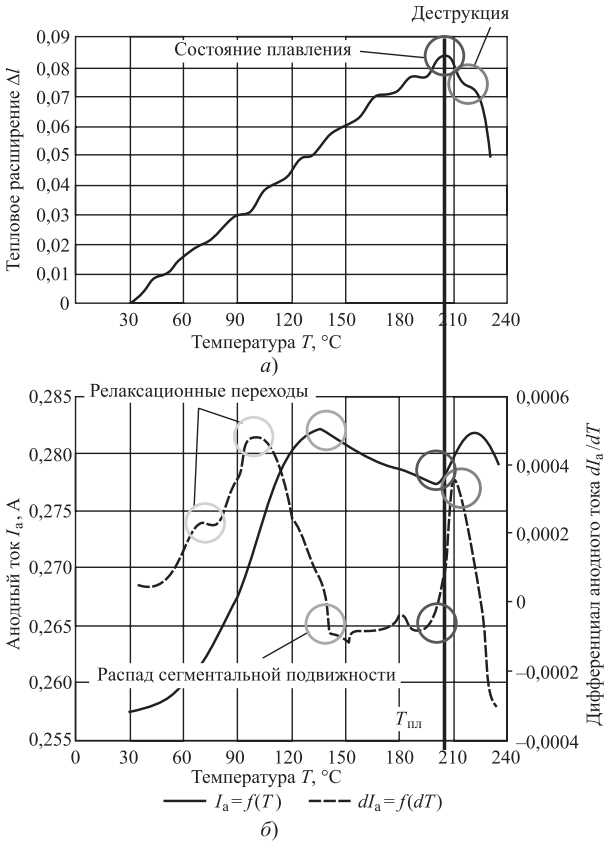


Рис. 5. Экспериментальные кривые:
а — $\Delta l = f(T)$; *б* — $I_а = f(T)$ и $dI_а = f(dT)$ (материал полиамид ПА6)

Анализ скорости изменения анодного тока также показал ряд экстремумов. Предположительно данные переходы относятся к релаксационным переходам: переход из кристаллического состояния в стеклообразное и из стеклообразного в высокоэластичное.

Выводы. На основе проведённых исследований получены следующие результаты:

впервые в рамках настоящих исследований применён метод комплексирования на основе амперометрического и термомеханического способов, который позволил контролировать фазовые превращения в полимерных материалах в процессе нагрева;

сформирован комплекс контролируемых и управляемых параметров фазовых состояний полимерных материалов и критерии их оценки;

определены зависимости электрофизических параметров технологической системы и фазовых превращений в полимерных образцах различных геометрических форм и размеров.

Разработанный способ определения фазовых и релаксационных превращений в полимерах позволяет принимать технические и технологические решения организации процесса управления термообработкой изделий из пластических и композиционных материалов.

Библиографические ссылки

1. **Еренков О.Ю.** К вопросу о регулировании надмолекулярной структуры полимерных материалов путём термообработки // Новые материалы и технологии в машиностроении. Хабаровск: ТОГУ, 2011. С. 29—32.

2. **Битюцкая Е.А.** Влияние степени кристалличности на свойства полимеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://sciencebsea.bgita.ru/2013/mashin_2013_17/ bituckaya_vl.htm (дата обращения: 5.09.2015).

3. **Филиппенко Н.Г.** Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов: дис. ... кан. тех. наук. Иркутск: 2012. 161 с.

4. **Румынский С.Н.** Автоматизированная система управления процессом сварки изделий из полиамида: дис. ... кан. тех. наук. СПб.: 2005. 133 с.

5. **Попов С.И.** Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров: дис. ... кан. тех. наук. Иркутск: 2013. 150 с.

6. **Марков А.В.** Математическая модель высокочастотной сварки термопластов // Материалы 19 Междун. науч. конф. "Математические методы в технике и технологиях". Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., Т. 5. Секция 5. 2006. С. 87—89.

7. **ПИД-закон** регулирования. Методы нахождения ПИД-коэффициентов [Электронный ресурс] // "Термодат". Режим доступа: http://www.termodat. ru/ pdf/pid.pdf (дата обращения: 25.09.2015).

УДК 007.51

А.В. Молчанский, Ж.А. Барабаш
(АО "ВПК "НПО машиностроения", г. Реутов)

molchanskii@yandex.ru

ОБЛИК АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ДОКУМЕНТАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ДЕТАЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ СОВМЕЩЁННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрен формализованный документооборот в производственной структуре. Проведён параметрический синтез автоматизированной системы для автоматизации документооборота в производственной структуре. На основе полученного облика системы разработаны критерии для дальнейшего анализа информационных систем автоматизации.

Ключевые слова: системный анализ; автоматизированная информационная система; производственная структура; документооборот.

A formalized documentation rotation in the production structure is considered. Parametric synthesis of the automated system for documentation rotation automation in the production structure is carried out. Criteria for further analysis of information systems automation is developed on the basis of the received appearance of the system.

Keywords: system analysis; automatic information system; production structure; documentation rotation.

Введение. Для формирования документации производства деталей летательных аппаратов (ЛА) в условиях совмещённого производства необходимо использовать автоматизированную информационную систему (АИС).

Типовой производственный процесс движения документации в единичном или мелкосерийном производстве показан на рис. 1.

Есть два контура управления движением документации — внешний и внутренний. В данной статье внутренний контур — производственная структура (ПС). Под ПС понимается самостоятельная организационная структура, выполняющая функцию производства продукции, в частности завод, цех, участок. Для описания облика АСУ в целях формализации документооборота в ПС с совмещённым производством используем алгоритм системного анализа, предусматривающий рассмотрение системы по следующим параметрам [1, 2]: состав системы; связи между компонентами системы; функционал системы; внешние связи системы; формулировка цели системы; этапы развития системы во времени.

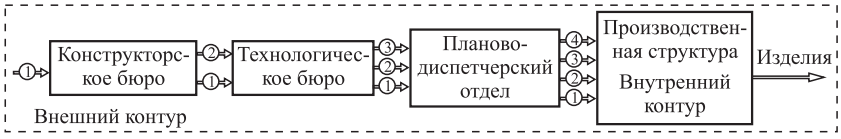


Рис. 1. Процесс движения документации:
① — техническое задание на разработку изделия; ② — конструкторская документация; ③ — технологическая документация; ④ — наряд планово-диспетчерского отдела

Облик АИС. Для организации оперативно-адаптивного формирования документации разработана АИС, состоящая из ядра и подсистемы клиентских автоматизированных рабочих мест (АРМ). Для передачи информации между компонентами системы используется локальная вычислительная сеть.

Ядро системы состоит из следующих компонентов: базы данных (БД); системы управления базой данных (СУБД); базы знаний о совмещённом производстве (БЗ); блока управления базовым производством; модуля формирования текущей документации; модуля создания отчетов; блока подготовки совмещённого производства; алгоритма оптимизации распределения операций по станкам; алгоритма построения оптимального производства на основе БЗ; модуля формирования документации.

На основе анализа производственной структуры — цеха для эффективного внедрения совмещённого производства разработана АИС-цех. Созданы рабочие места со следующими задачами: АРМ диспетчера — обмен информацией с внешней средой, формирование наряда; АРМ начальника технологического бюро — распределение работ между технологами; АРМ технолога — разработка технологии изготовления изделия; АРМ кладовщика — управление ресурсами производственной структуры; АРМ мастера — мониторинг состояния оборудования и распределение ра-

бот на технологическом оборудовании; АРМ ОТК — технический контроль процесса механической сборки; АРМ экономиста — мониторинг состояния задания, создание отчетной документации; АРМ начальника производственной структуры — принятие управленческих решений на основе сформированных подсистемой рекомендаций, мониторинг состояния заказа; АРМ администратора — неограниченные права доступа к подсистеме для настройки и внесения исправлений в её работу [1].

Система апробирована для цеха, но при необходимости может быть адаптирована как для более крупной, так и для меньшей ПС.

Система управления базой данных предназначена для управления базой данных, хранящей информацию о производстве изделий, созданных или создаваемых ПС.

База знаний спроектирована на основе фреймовых моделей, описывающих совмещённое производство. Фреймы, хранящиеся в БЗ, могут быть как заполненными фреймами-экземплярами, так и пустыми фреймами-прототипами, заполняемыми из БД при работе блока подготовки совмещённого производства.

Блок управления основным производством служит для заполнения БД информацией об изделиях основного производства, технологических процессах и времени выполнения технологических операций.

Блок подготовки совмещённого производства [2] выполняет следующие функции: выборку данных из БД для заполнения фреймов-прототипов информацией из БД о текущем состоянии производства; сравнение фреймов-экземпляров с фреймами, содержащимися в БЗ; выдачу рекомендаций по совмещённому производству изделий.

Облик системы, полученный в результате применения методики параметрического синтеза в целях внедрения АИС оперативно-адаптивного формирования документации для производства моделей ЛА в условиях совмещённого производства, представлен на рис. 2.

На основе разработанного облика АИС сформируем критерии для оценки различных систем автоматизации подготовки производства. Для определения оптимальной системы воспользуемся методом анализа иерархий (МАИ).

МАИ является методологической основой для решения задач выбора альтернатив при помощи их многокритериального рейтингования [3]. Основное применение метода — поддержка принятия решений на основе иерархической композиции задачи. В МАИ используется алгоритм принятия подобных решений: все критерии попарно сравниваются друг с другом по шкале от 1 до 9. Рекомендуется использовать парные сравнения, а для фиксации результата используется шкала следующего типа: если два критерия одинаково важны, в таблицу сравнений заносится 1; если один критерий незначительно важнее другого, то заносится 3; если один критерий значительно важнее другого, то заносится 5; если один критерий явно важнее другого, то заносится 7; если критерий абсо-

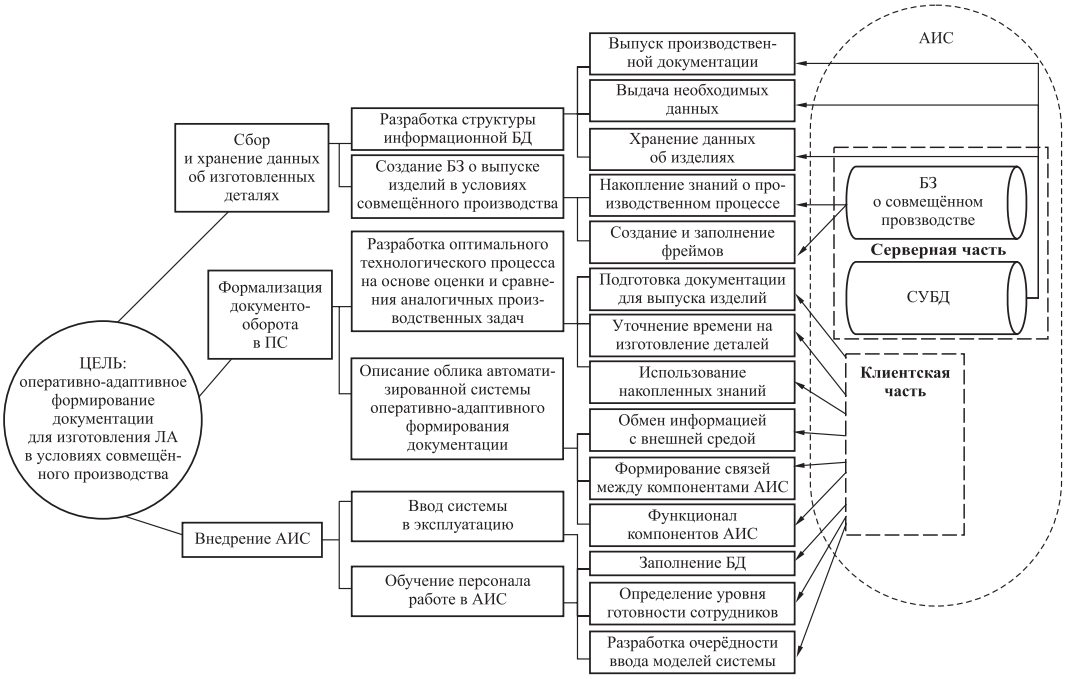


Рис. 2. Синтез системы формирования документации для изготовления элементов конструкции ЛА в условиях совмещённого производства

Таблица 1

Оценка альтернатив по разработанным критериям

Критерии	АИС № 1	АИС № 2	АИС № 3 (АИС-цех)	АИС № 4
Пользовательский интерфейс	Система создана на основе клиент-серверной архитектуры. Имеются модули со своими функциями	Модули настраиваются под задачу каждого подразделения. Имеется WEB-интерфейс	Система разбита на модули с соответствующими функционалами	Система состоит из отдельных модулей с определёнными задачами
База данных	Информация о деталях хранится в БД. В качестве СУБД используется Microsoft SQL Server	Для управления базой данных применяется СУБД Microsoft SQL Server	Для управления базой данных применяется СУБД MySQL	Система работает с любыми БД
База знаний	Имеется возможность сохранять информацию об отклонении от технологии производства, а также формировать технологический процесс на основе деталей-аналогов	Имеется возможность накапливать актуальную информацию о ходе выполнения работ по заказу и об особенностях изготовления тех или иных партий деталей, учитывать фактические материальные и трудовые затраты	Имеется возможность вести библиотеки расчетных методик, хранить расчёты технологических параметров, формировать технологический процесс на основе деталей-аналогов	Нет сведений
Формирование документации	На этапе производства формируются группы документов: сводные ведомости, сведения о потребностях и лимитах ресурсов, загрузке оборудования, отклонениях от норм; выпускаются требования для склада, справки о трудозатратах	Формируются производственные задания – рабочие наряды, на основе которых обеспечиваются распределение работ и оперативный учёт в рамках цеха. Наряд содержит информацию о работах, которые необходимо выполнить: виды работ (операции), сроки выполнения работ, исполнители, оборудование, ссылки на необходимые, фактические сведения о выполнении работ	Формируются отчёты производстве. Представляются обобщённые данные о производстве в режиме реального времени. Имеется редактор отчётов, и возможна интеграция с другими программами	Производится расчёт производственных заданий, загрузки оборудования, производственных нарядов, эффективности производства и формируется соответствующая документация
Формирование производственных заданий на работу	Формируются сопроводительный лист и нормированное задание	Формируется наряд на работу с выдачей необходимой документации	Формируется наряд на работы и учитывается их выполнение	Формируется производственный наряд
Распределение работ в технологическом бюро	Отсутствует	Нет сведений	Распределяются наряды между технологами	Нет сведений
Разработка технологии	Разрабатывается пооперационный технологический процесс	Разрабатывается пооперационный технологический процесс	Разрабатывается пооперационный технологический процесс	Создаются и ведутся технологические маршруты изделий
Управление ресурсами	Учитываются основные производственные фонды, расходные материалы, комплектующие и инструмент	Система оперирует несколькими видами ресурсов: основные материалы, вспомогательные материалы, покупные изделия, оборудование, оснастка, инструмент, кадры, субподрядные работы и позволяет рассчитывать первичные, вторичные и третичные нетто- и брутто-потребности	В расчётах обеспеченности материальными ресурсами учитываются различные варианты допустимых замен материалов и покупных комплектующих изделий	Контролируются состояние и распределение ресурсов (RAS)
Контроль сроков завершения производственных процессов	Составляется производственный план, в случае возникновения отклонений ведётся их учёт	По каждому номерному узлу или детали существует возможность хранить информацию о движении в производстве, исполнителях технологических операций	Представляются данные и контролируется ход производства в режиме реального времени	Прохождение деталей в производстве отслеживается на основе индикаторов производства
Контроль прохождения документации и времени изготовления детали	Документация выпускается по мере выполнения производственных операций	Собирается информация о работах, которые необходимо выполнить: виды работ (операции), сроки выполнения работ, исполнители, оборудование, ссылки на необходимые документы, фактические сведения о выполнении заданий	Проводятся мониторинг выполнения производственной программы и её корректировка по результатам выполнения и при недостаточночти ресурсов	Нет сведений

Таблица 2

Матрица сравнения критериев альтернатив для многокритериального рейтингования

Критерий	Пользовательский интерфейс	Наличие базы данных	База знаний	Формирование документации	Формирование производственных заданий на работу	Распределение работ в технологическом бюро	Разработка технологии	Управление ресурсами	Контроль сроков завершения производственных процессов	Контроль прохождения документации и времени изготовления детали
Пользовательский интерфейс	1	1/5	1/3	1/7	1/2	1	1/9	1/7	1/9	1/9
Наличие базы данных	5	1	2	1/3	2	3	1/3	1	1/2	1/5
База знаний	3	1/2	1	1/4	1	3	1/5	1/2	2	1
Формирование документации	7	3	4	1	2	4	1	1/2	1	1/3
Формирование производственных заданий на работу	2	1/2	1	1/2	1	5	1/3	1	1/3	1/4
Распределение работ в технологическом бюро	1	1/3	1/3	1/4	1/5	1	1/2	1/4	1/7	1/7
Разработка технологии	9	3	5	1	3	2	1	1	2	1/4
Управление ресурсами	7	1	2	2	1	4	1	1	1/3	1/3
Контроль сроков завершения производственных процессов	9	2	1/2	1	3	7	1/2	3	1	1/4
Контроль прохождения документации и времени изготовления детали	9	5	1	3	4	7	4	3	4	1

лютно превосходит по значимости другой, то заносится 9; значения 2, 4, 6, 8 используются как промежуточные к тем, что указаны выше.

Далее проводится оценка ведущих систем, представленных на рынке, по разработанным критериям (табл. 1). Для объективности оценки их названия скрыты. При выборе систем для анализа использовалась методика выбора систем управления производственной структурой.

Следующий шаг состоит в вычислении вектора приоритетов по матрице, приведённой в табл. 2, для каждой альтернативы. В математических терминах это вычисление главного собственного вектора, который после нормализации становится вектором приоритетов. Для расчёта собственного вектора использовался программный пакет MATHCAD. Вычисленный вектор приоритетов имеет вид Q = (0,233; 0,234; 0,416; 0,117). Выполненный расчёт показывает, что наиболее оптимальной из альтернатив является АИС № 3. Это говорит о преимуществе разработанной системы для использования в совмещённом производстве.

Выводы:

1. Рассмотрен формализованный процесс прохождения документации в ПС с совмещённым производством.

2. С использованием методов системного анализа построен облик АИС для оперативно-адаптивного формирования документации в ПС при совмещённом производстве.

3. На основе полученного облика АИС сформированы критерии для анализа АИС методом анализа иерархий.

4. Проведённый анализ систем показал, что разработанная АИС для цеха является оптимальной среди выбранных, так как имеет преимущество по критериям "формирование документации и контроль прохождения документации" и "время изготовления детали", которые очень важны для построения системы оперативно-адаптивного формирования документации на изделия в условиях совмещённого производства.

Библиографические ссылки

1. **Ильичев А.В.** Основы анализа эффективности и рисков целевых программ. М.: Научный мир, 2004.

2. **Барабаш Ж.А., Молчанский А.В.** Методика выбора систем оперативного управления производственной структурой // Экономика и управление в машиностроении. 2013. № 1. С. 23—27.

3. **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993.

УДК 628.9

О.Е. Железникова, канд. техн. наук, доц., **А.М. Кокинов,** д-р техн. наук, проф.,
Л.В. Синицына, канд. техн. наук, доц.
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва)
С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф.
(Московский технологический университет)

mikaeva@npo.lit.ru

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЦЕПТОРНОГО АППАРАТА ОРГАНА ЗРЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ОСВЕЩЕНИЯ СВЕТОДИОДАМИ

Представлены результаты экспериментальных исследований состояния периферического звена органа зрения. Дана оценка ретинального утомления в условиях освещения светодиодами и люминесцентными лампами при выполнении полуторачасовой напряжённой зрительной работы.

Ключевые слова: освещение светодиодами; орган зрения; состояние рецепторного аппарата; зрительная нагрузка; зрительное утомление; метод кампиметрии; пороги цветоразличения; экспериментальные исследования.

The results of experimental studies of the organ of sight peripheral link condition are introduced. The estimation of retinal fatigue in conditions of lighting LEDs and fluorescent lamps when the hour and a half of intense visual work is given.

Keywords: LED lighting; organ of sight; the state of the receptor apparatus; visual load; visual fatigue; campimetry method; color discrimination thresholds; experimental studies.

В современных условиях деятельность человека сопровождается постоянными повышенными нагрузками на орган зрения. Поэтому при создании оптимальной световой среды важно контролировать зрительное утомление, которое связано как с характером зрительных задач, так и с условиями освещения.

Известно, что развивающееся утомление приводит к снижению функций зрения. Одним из ранних методов обнаружения зрительного утомления может быть установление наличия изменения в реакции рецепторов различных видов, в первую очередь зрительного анализатора. Результатом зрительного утомления может быть, в частности, утомление в механизмах первичного анализа — процессы, протекающие в сетчатой оболочке, приводящие к снижению её активности [1—4].

Большое значение как метод функциональной диагностики, позволяющий судить о состоянии рецепторного аппарата, имеет исследование поля зрения [5—7]. Так, Ф.М. Черниловской [2] было применено периметрическое определение границ полей зрения для исследования механизма действия пульсации светового потока разрядных источников света. Проведённые наблюдения свидетельствуют о влиянии глубины колебаний светового потока на фоторецепторные элементы сетчатки.

Рядом авторов [6] отмечается информативность метода кампиметрии при оценке функционального состояния сетчатки органа зрения. При этом методе на плоскости исследуются форма и размеры слепого пятна. Представляют интерес работы [7—9], посвящённые изучению физиологической площади слепого пятна.

Другим показателем функционального состояния сетчатки является цветовая чувствительность, в частности цветовые пороги.

Исследования [10—12] свидетельствуют о том, что острота цветоразличения очень отзывчива к условиям освещения, в частности к спектральному составу источников света.

Цель данной работы — проведение серии экспериментальных исследований по оценке влияния условий освещения светодиодами на состояние рецепторного аппарата органа зрения при выполнении напряжённых зрительных работ.

Учитывая изложенное выше, для оценки состояния рецепторного аппарата органа зрения в исследованиях использовали динамику площади проекции слепого пятна [13] и порогов цветоразличения на красный, зелёный и синий цвета при выполнении напряжённой зрительной работы.

Анализ результатов исследования площади проекции слепого пятна по методу кампиметрии показал, что разброс данных у отдельного

наблюдаемого не превышал 10 %, а между наблюдаемыми — 15 %, что дало возможность проводить статистическую обработку результатов для всех наблюдаемых совместно.

Была проведена проверка распределения результатов исследования по критерию χ^2, которая показала, что распределение подчиняется нормальному закону.

В табл. 1 представлены результаты исследования динамики площади проекции слепого пятна после зрительной работы в условиях освещения светодиодами и люминесцентными лампами.

Анализ приведённых в табл. 1 данных показывает, что после зрительной нагрузки имеет место достоверное увеличение физиологической площади слепого пятна при всех исследованных вариантах освещения ($p < 0{,}05$). Для оценки влияния условий освещения (уровня освещённости, спектрального состава излучения, цветовой температуры) на развитие ретинального утомления для каждого варианта был рассчитан коэффициент корреляции, подтвердивший однотипность изменений физиологической площади слепого пятна у наблюдаемых до и после зрительной нагрузки (см. табл. 1). Диапазон увеличения площади проекции диска зрительного нерва по отношению к исходному для вариантов освещения люминесцентными лампами составил 6,57...12,06 %; для вариантов освещения светодиодами — 3,87...10,77 %. Сопоставление динамики площади проекции диска зрительного нерва при зрительной нагрузке показало, что освещение светодиодами с цветовой температурой 3000 К способствует меньшему зрительному утомлению по сравнению с освещением люминесцентными лампами ($p < 0{,}05$). Так, после зрительной нагрузки при освещении люминесцентными лампами при освещённости 200 лк площадь проекции зрительного нерва больше, чем при освещении светодиодами, на 1,73 %, для 400 лк — на 3,1 %, для 1000 лк — на 2,23 %. Проверка достоверности этих различий подтверждена t-критерием Стьюдента с высоким уровнем значимости ($p < 0{,}01$). Для освещения с цветовой температурой 5000 К различия по исследуемому показателю между сравниваемыми вариантами освещения уменьшаются незначительно ($p < 0{,}05$).

Таблица 1

Изменение площади проекции слепого пятна

Освещённость, лк	Цветовая температура, К	До работы		После работы		Коэффициент корреляции	
		Площадь слепого пятна $\bar{x}$, см^2	Доверительный интервал, $t\sigma_{\bar{x}}$	Площадь слепого пятна $\bar{x}$, см^2	Доверительный интервал, $t\sigma_{\bar{x}}$	r (между до и после работы)	$p(r)$
При освещении светодиодами							
200	3000	80,10	12,10	85,10	7,39	0,77	$p < 0{,}05$
400				83,20	6,21	0,80	$p < 0{,}05$
1000				84,30	8,89	0,84	$p < 0{,}01$
200	4000	80,30	7,97	85,70	8,02	0,72	$p < 0{,}05$
400				83,60	7,62	0,91	$p < 0{,}001$
1000				84,90	6,55	0,78	$p < 0{,}01$
200	5000	81,70	8,45	90,50	8,46	0,73	$p < 0{,}05$
400				89,20	11,02	0,81	$p < 0{,}01$
1000				88,40	6,73	0,82	$p < 0{,}001$
При освещении люминесцентными лампами							
200	3000	80,30	8,67	86,70	11,20	0,83	$p < 0{,}01$
400				85,90	9,34	0,77	$p < 0{,}05$
1000				86,30	7,87	0,70	$p < 0{,}05$
200	4000	80,70	7,75	87,10	8,62	0,83	$p < 0{,}001$
400				86,00	6,47	0,73	$p < 0{,}05$
1000				86,30	8,58	0,83	$p < 0{,}05$
200	5000	82,10	9,87	92,00	7,91	0,72	$p < 0{,}05$
400				90,40	5,82	0,61	$p < 0{,}05$
1000				89,60	7,40	0,58	$p < 0{,}05$

Таким образом, исследования ретинального утомления по состоянию периферического зрения позволили достоверно установить увеличение физиологической площади слепого пятна после выполнения напряжённой зрительной работы. Это подтверждает взгляды ряда авторов, отводящих периферической части зрительного анализатора ведущую роль в механизмах адаптации после световых воздействий [14]. Необходимо отметить, что к началу следующего дня физиологическая площадь слепого пятна у наблюдаемых восстанавливалась до первоначального уровня. Аналогичные выводы получены в [15], где указано на слабую выраженность морфоструктурных изменений в тканях глаза под действием функ-

циональной нагрузки при благоприятных условиях производственного процесса. Такие колебания зрительных функций объясняются общим психофизическим утомлением и обратимыми изменениями в тканях глаза.

При исследовании остроты цветоразличения установлен неодинаковый характер изменения порогов цветоразличения при различных вариантах освещения. В табл. 2 представлена динамика порогов цветоразличения на красный, зелёный и синий цвета при освещении люминесцентными лампами и светодиодами. Следует подчеркнуть, что характер зрительной нагрузки наблюдаемых не был связан с задачами цветоразличения объектов.

Во всех экспериментах отмечена тенденция к росту порогов, хотя не всегда увеличение порогов достоверно ($p > 0{,}05$). Так, это отмечено для варианта освещения люминесцентными лампами и светодиодами при цветовой температуре 5000 К и освещённости 1000 лк для цветоразличения на красный цвет; для варианта освещения светодиодами при цветовой температуре 5000 К и освещённости 400 и 1000 лк — на зелёный цвет; для варианта освещения светодиодами при цветовой температуре 3000 К и освещённости 200, 400 лк и 1000 лк — на синий цвет.

Снижение чувствительности на красный цвет выявлено при зрительной работе при освещении как люминесцентными лампами, так и светодиодами. Так, для сравниваемых вариантов освещения с цветовой температурой 5000 К и освещённости 400 лк снижение составило 0,4 ($p < 0{,}05$). Для сравниваемых вариантов с цветовой температурой 4000 К и освещённостью 1000 лк снижение порогов на красный цвет составило 0,6 ($p < 0{,}05$). Сопоставление экспериментальных данных для других вариантов показало, что при освещении светодиодами изменение порогов выше. Это свидетельствует о некотором снижении чувствительности к-рецепторов сетчатки.

Снижение чувствительности на зелёный цвет выявлено при зрительной работе при освещении как люминесцентными лампами,

Таблица 2

Изменение порогов цветоразличения после зрительной нагрузки при освещении люминесцентными лампами и светодиодами

Освещённость, лк	Цветовая температура, К	Освещение люминесцентными лампами		Освещение светодиодами		Достоверность различий между вариантами освещения по *t*-критерию Стьюдента
		Изменение $\Delta_{пор}$	Достоверность различий по *t*-критерию Стьюдента	Изменение $\Delta_{пор}$	Достоверность различий по *t*-критерию Стьюдента	
Цветоразличение на красный цвет						
200	3000	0,8	$p < 0{,}05$	0,7	$p < 0{,}05$	—
400		0,8	$p < 0{,}05$	0,7	$p < 0{,}05$	—
1000		0,7	$p < 0{,}05$	0,6	$p < 0{,}05$	—
200	4000	0,7	$p < 0{,}05$	0,6	$p < 0{,}05$	—
400		0,7	$p < 0{,}05$	0,6	$p < 0{,}05$	—
1000		0,6	$p < 0{,}05$	0,6	$p < 0{,}05$	—
200	5000	0,5	$p < 0{,}05$	0,4	$p < 0{,}05$	—
400		0,4	$p < 0{,}05$	0,4	$p < 0{,}05$	—
1000		0,3	—	0,3	—	—
Цветоразличение на зелёный цвет						
200	3000	0,9	$p < 0{,}05$	0,8	$p < 0{,}05$	—
400		0,8	$p < 0{,}05$	0,8	$p < 0{,}05$	—
1000		0,7	$p < 0{,}05$	0,7	$p < 0{,}05$	—
200	4000	0,8	$p < 0{,}05$	0,7	$p < 0{,}05$	—
400		0,7	$p < 0{,}05$	0,7	$p < 0{,}05$	—
1000		0,7	$p < 0{,}05$	0,6	$p < 0{,}05$	—
200	5000	0,4	$p < 0{,}05$	0,4	$p < 0{,}05$	—
400		0,4	$p < 0{,}05$	0,3	—	—
1000		0,4	$p < 0{,}05$	0,3	—	—
Цветоразличение на синий цвет						
200	3000	0,8	$p < 0{,}05$	0,6	$p < 0{,}05$	—
400		0,7	$p < 0{,}05$	0,5	$p < 0{,}05$	—
1000		0,7	$p < 0{,}05$	0,5	$p < 0{,}05$	—
200	4000	0,7	$p < 0{,}05$	0,5	$p < 0{,}05$	—
400		0,6	$p < 0{,}05$	0,4	$p < 0{,}05$	—
1000		0,7	$p < 0{,}05$	0,4	$p < 0{,}05$	$p < 0{,}05$
200	5000	0,5	$p < 0{,}05$	0,3	—	—
400		0,5	$p < 0{,}05$	0,2	—	$p < 0{,}05$
1000		0,5	$p < 0{,}05$	0,2	—	$p < 0{,}05$

так и светодиодами. Так, при освещённости 200 лк и цветовой температуре 5000 К снижение составило 0,4 ($p < 0,05$). Одинаковый характер снижения порогов на зелёный цвет для сравниваемых условий освещения отмечен для вариантов с цветовой температурой 4000 К и освещённостью 400 лк, где относительное снижение составило 0,7 ($p < 0,05$); для вариантов с цветовой температурой 3000 К и освещённостью 400 и 1000 лк, где относительное снижение составило соответственно 0,8 ($p < 0,05$) и 0,7 ($p < 0,05$). Полученные результаты свидетельствуют об одинаковом механизме воздействия излучения люминесцентных ламп и светодиодов на снижение чувствительности з-рецепторов сетчатки.

Максимальное снижение порогов цветоразличения на синий цвет выявлено при зрительной работе при освещении светодиодами. Так, при освещении с цветовой температурой 4000 К и освещённостью 400 и 1000 лк относительное снижение порогов составило 0,4 ($p < 0,05$). Сопоставление экспериментальных данных для других вариантов освещения показало, что при освещении светодиодами пороги снижаются интенсивнее, что свидетельствует о некотором понижении чувствительности с-рецепторов сетчатки.

Анализ полученных результатов показывает, что при зрительной работе в условиях освещения люминесцентными лампами и светодиодами функциональное состояние сетчатки не было одинаковым, что, очевидно, связано с протекающими в ней фотохимическими реакциями, которые могут тормозиться и усиливаться под действием излучений различных участков видимого спектра. Эти изменения оказывают влияние на особо чувствительную функцию сетчатки — цветоразличение. Как показывают приведённые данные в табл. 2, влияние спектрального состава излучения выявлено только при исследовании с-рецептора сетчатки для излучения с цветовой температурой 4000 К (освещённость 1000 лк) и 5000 К (освещённость 400 и 1000 лк). Для других исследованных условий влияние спектрального состава оказалось незначительным, что может быть объяснено характером зрительных задач — работа с ахроматическими объектами, не связанная с определением цветовых различий, а также качественными параметрами освещения — благоприятным спектральным составом излучения, отсутствием пульсации светового потока.

Результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующий **вывод:** освещение светодиодами не вызывает вредного воздействия на орган зрения, в частности на его рецепторный аппарат. Имеющие место при выполнении зрительных работ изменения исследованных функциональных показателей органа зрения (площади проекции зрительного нерва, цветовых порогов на красный, зелёный и синий цвета) входят в соответствующие границы физиологических колебаний и имеют обратимый характер.

Библиографические ссылки

1. **Кравков С.В.** Глаз и его работа. М.: Изд-во АН СССР, 1950.

2. **Черниловская Ф.М.** Освещение промышленных предприятий и его гигиеническое значение. Л.: Медицина, 1971. 288 с.

3. **Еншина О.Д., Фаермарк М.А.** О величине зрительного утомления в производственных условиях // Светотехника. 1981. № 9. С. 10—12.

4. **Мешков В.В., Матвеев А.Б.** Основы светотехники. Ч. 2. М.: Энергоиздат, 1989. 32 с.

5. **Новохатский А.С.** Клиническая периметрия. М.: Медицина, 1973. 131 с.

6. **Морозов В.И., Яковлев А.А.** Заболевание зрительного пути. Клиника. Диагностика. Лечение. М.: БИНОМ, 2010. 680 с.

7. **Бенштейн И.Ю.** О физиологической величине площади слепого пятна // Офтальмологический журнал. 1963. № 5. С. 290—293.

8. **Пильганчук В.В.** Физиологическая площадь слепого пятна // Офтальмологический журнал. 1987. № 6. С. 363—365.

9. **Новый** метод компьютерной кампиметрии в практике офтальмолога / А.П. Нестеров, Т.Б. Романова, Ж.Ю. Алябьева, А.В. Лактионов // Клиническая офтальмология. 2003. Т. 4. № 2. С. 63—67.

10. **Ильина Е.И.** Спектральный состав излучения и работоспособность контролеров цветной продукции // Светотехника. 1987. № 5. С. 4—5.

11. **Черниловская Ф.М., Чернова С.А.** Цветоразличение в условиях освещения новыми газоразрядными источниками света // Гигиена труда и профзаболевания. 1975. № 11. С. 5—8.

12. **Коваленко В.В., Лиман А.Д., Мельникова С.И.** Цветовые пороги при выполнении напряжённой зрительной работы в условиях освещения различными источниками света // Гигиена труда и профзаболевания. 1977. № 7. С. 47—48.

13. **Способ** определения зрительного утомления / Аксенова С.В., Куликова М.П., Железникова О.Е. и др. Патент России № 2534910 МПК 7 А 61 В 3/02. 2014. Бюл. № 34.

14. **Зрительная** работоспособность при различных источниках света / А.Я.Новик, А.М. Солдатова, В.Г. Мартиросова, Л.В. Семенец // Врачебное дело. 1991. № 8. С. 97—99.

15. **Профессиональные** заболевания органа зрения и их профилактика на некоторых предприятиях / Д.Р. Иванов, Н.В. Кадикина, А.Г. Старченко, Н.В. Павлова // Офтальмологический журнал. 1989. № 5. С. 257—261.

УДК 004.9

Л.Ф. Ноженкова, д-р техн. наук, проф., **О.С. Исаева**, канд. техн. наук
(Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск)
Р.В. Вогоровский
(Сибирский федеральный университет, г. Красноярск)

expert@icm.krasn.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ИСПЫТАНИЙ КОМАНДНО-ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ БОРТОВОЙ АППАРАТУРОЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Выполнена автоматизация испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой космического аппарата. Объект контроля — командно-измерительная система, которая выполняет приём, обработку и передачу команд между наземным и бортовым комплексами управления. Для построения испытательных процедур разработано программное обеспечение, позволяющее задавать последовательности команд, параметры передачи, методы контроля, выполнять анализ и визуализацию результатов.

Ключевые слова: космический аппарат; бортовая аппаратура; командно-измерительная система; автоматизация испытаний; пакеты телекоманд; телеметрия.

The command and program control test automation of the spacecraft on-board facility is carried out. Object of the control is command and measurement system that performs the reception, processing and transmission of commands between the ground and on-board control complexes. Software is developed for the test procedures construction. This allows you to specify a sequence of commands, transmission parameters, control methods and perform the analysis and visualization of results.

Keywords: spacecraft; on-board equipment; command-and-measurement system; test automation; telecommand packages; telemetry.

Введение. Бортовая аппаратура космического аппарата (КА) представляет собой высокотехнологичную продукцию с длительным жизненным циклом. От качества её испытаний в наземных условиях зависит работоспособность КА в течение всего срока его активного существования в условиях космического пространства [1]. Под испытанием понимается экспериментальное определение количественных или качественных свойств объекта как результата воздействия на него при функционировании. Целью испытания является установление соответствия характеристик объекта испытания заданным требованиям [2]. Объектом испытаний является бортовая аппаратура командно-измерительной системы (КИС) КА. КИС предназначена для поддержки взаимодействия КА с наземным комплексом управления. Она позволяет выполнять командно-программное управление бортовыми системами и контроль состояния приборов КА [3]. Наземные испытания КИС направлены не только на анализ технических характеристик устройств, но и на исследование сложных алгоритмов их функционирования и методов взаимодействия с оборудованием при постоянном контроле в телеметрическом кадре состояния бортовых систем и реакций на прохождение команд.

Правила проведения проверок различных объектов контроля определяются международными и отраслевыми стандартами, а также правилами и методиками отдельных предприятий. К таким стандартам относятся ISO/IEC 9646, определяющий методологию проведения функциональных испытаний коммуникационных систем [4], стандарты Европейского космического агентства, содержащие правила и порядок испытаний бортовой аппаратуры КА [5, 6]. На основе стандартов и методик разрабатываются программы испытаний, создаются как универсальные системы, или языки программирования, так и специализированные программно-аппаратные комплексы, примеры которых представлены в [7—10]. Особенностью испытания бортовых систем является наличие в них внутренних программ работы, собственных протоколов и

наборов данных для информационного взаимодействия [11]. Задачи адаптации существующих программных решений для заданной предметной области, создания интерфейсов наглядного построения испытательных процедур, реализации методов контроля приёма и передачи данных по заданным стандартам являются трудоёмкими и зачастую невыполнимыми. На основе проведённых исследований технологий построения существующих тестирующих и испытательных систем авторами разработано собственное программное обеспечение, предназначенное для планирования, подготовки и проведения испытаний бортовой аппаратуры. Программное обеспечение поддерживает взаимодействие различных средств измерений, вычислительной техники и вспомогательных устройств, функционально объединённых в программно-аппаратный комплекс контрольно-проверочной аппаратуры (КПА). Такая аппаратура предназначена для получения измерительной информации о физических величинах, свойственных объекту [12]. Анализ результатов испытаний и контроль логики функционирования выполняются программным обеспечением. Оно позволяет имитировать внешнее командно-программное управление бортовой аппаратурой: задавать последовательности команд, критерии их передачи и контроля отработки, визуализировать получаемые результаты измерений и телеметрические кадры. Применение современных подходов к автоматизации испытаний позволяет повысить качество, снизить себестоимость и сократить сроки изготовления бортовых устройств.

Задачи автоматизации испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой. Для разработки методов и программных средств автоматизации испытаний выполнено исследование назначения и характеристик объекта контроля — КИС. КИС получает телекоманды с наземного комплекса управления, выполняет их первичную обработку и передачу в бортовой комплекс управления. В обратном направлении КИС осуществляет передачу пакетов телеметрии с информацией о состоянии бортовых систем КА и результатами отработки телекоманд. Более подробное описание логики работы бортовой аппаратуры КИС и методов моделирования её функционирования приведено в работе [13].

Автономные испытания проводятся без подключения сопряжённых систем, поэтому в процессе испытаний требуется имитировать

Рис. 1. Потоки данных при испытаниях бортовой аппаратуры

работу устройств, взаимодействующих с объектом контроля, моделировать передачу потоков данных от программ, имитирующих бортовые системы, к реальному оборудованию. На рис. 1 приведена схема информационных потоков данных, которые необходимо моделировать при проведении испытаний бортовой аппаратуры.

Программный имитатор выполняет функции передачи телекоманд от наземного комплекса управления (стрелка 1) в КИС, которая после приёма команды добавляет квитанцию о ней в передаваемый пакет телеметрии (стрелка 2). КИС выполняет передачу команды в программный имитатор, который при испытаниях выполняет функции бортового комплекса управления (стрелка 3). Для контроля отработки команды имитатор бортового комплекса управления программно формирует ответ и передаёт его в КИС (стрелка 4). Контроль отработки осуществляется по получаемой телеметрии (стрелка 5). В реальных условиях функционирование бортовых систем характеризуется большой вариативностью представления команд и структур телеметрии, вызванной широким спектром назначения и использования КА, постоянным увеличением требований к надёжности и сроку их активного существования. Для унификации построенных решений в качестве протоколов передачи данных рассматриваются стандарты Европейского космического агентства. Стандарт ESA PSS-04-107 [14] предназначен для передачи телекоманд, а стандарт ESA PSS-04-106 [15] — для телеметрии.

Для того чтобы выделить задачи, которые необходимо автоматизировать, определить состав подсистем и функции программного обеспечения, разработаны функциональные диаграммы. Пример диаграммы, описывающей первый уровень задач для испытания командно-программного управления бортовой аппаратурой, приведён на рис. 2.

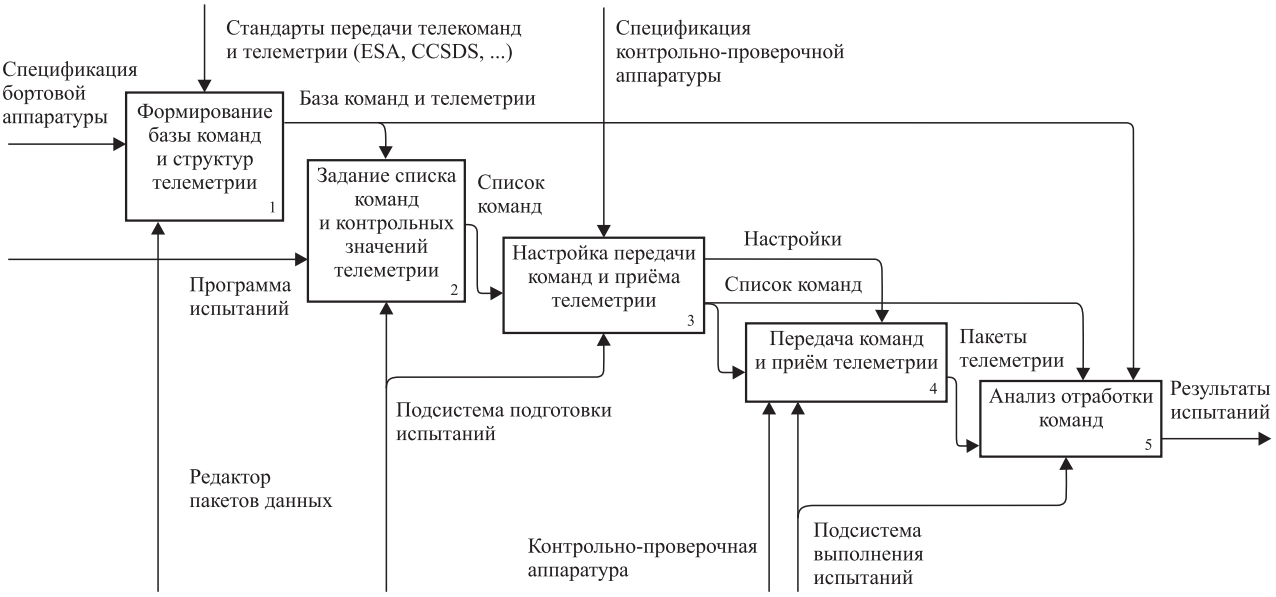


Рис. 2. Функциональная диаграмма проведения испытаний

Выделены пять основных этапов проведения испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой:

формирование базы команд и структур телеметрии;

задание списка команд и контрольных значений телеметрии;

настройка передачи команд и приёма телеметрии;

передача команд и приём телеметрии;

анализ отработки команд.

Формирование базы команд осуществляется программными инструментальными средствами подсистемы "Редактор пакетов данных", которые позволяют создавать пакеты команд и телеметрии произвольной структуры. Создание списка команд, задание контрольных значений телеметрии, настройка параметров приёма-передачи выполняет "Подсистема подготовки испытаний". Передачу команд и приём телеметрии осуществляет "Подсистема выполнения испытаний". Кроме того, эта подсистема отвечает за анализ отработки команд командно-измерительной системой.

Функциональные диаграммы следующих уровней расширяют описание задач, выделяя критерии контроля результатов испытаний, перечни действий при корректном прохождении испытания или возникновении критических ситуаций, а также данные, которые необходимо вносить в детализированный отчёт для отображения особенностей функционирования объекта контроля. Выделенные функциональные задачи полностью реализованы и встроены в программное обеспечение КПА КИС [16]. Программное обеспечение как выполняет испытания в автоматическом режиме, так и поддерживает исследовательский режим работы под управлением конструктора бортовой аппаратуры.

Организация проведения испытаний. Проведение испытаний командно-программного управления бортовой аппаратурой КА осуществляется средствами разработанного авторами программного обеспечения. Создание испытательной процедуры начинается с определения структур пакетов данных телекоманд, задания назначения и свойств отображения полей телеметрии. Все настройки выполняются в графическом редакторе и могут изменяться в процессе работы. На рис. 3

Название	Длина	Тип поля	Значение по умолчанию
ТМ транспортный кадр	508	Байт	00 00 00 00 00 00 00 00 (
Заголовок трансп. кадра	6	Байт	00 00 00 00 00 00
Ид. номер кадра	2	Байт	00 00
Номер версии	2	Бит	00
Ид. номер КА	10	Бит	0000000000
Ид. номер виртуального канала	3	Бит	000
Флаг рабочего контрольного п...	1	Бит	0
Счетчик кадра основного канала	1	Байт	00
Счетчик кадра виртуального канала	1	Байт	00
Состояние поля данных кадра	2	Байт	00 00
Флаг вторичного заголовка	1	Бит	0
Флаг синхронизации	1	Бит	0
Флаг порядка пакетов	1	Бит	0
Ид. номер длины сегмента	2	Бит	00
Указатель первого заголовка	11	Бит	00000000000
Поле данных транспортного кадра	496	Байт	00 00 00 00 00 00 00 00 (
Пакет БАТС/БЦВК	426	Байт	00 00 00 00 00 00 00 00 (

Рис. 3. Пример структуры телеметрического кадра в редакторе пакетов данных

приведён пример структуры телеметрического кадра (ТК) в редакторе пакетов данных.

Для имитации функций наземного и бортового комплексов управления разработано визуальное окно настройки команд. В редакторе, показанном на рис. 4, задаются перечень команд и настройки передачи каждой из них: коммутационный интерфейс, время ожидания реакции на команду, число повторений, способ передачи, контролируемые поля и контрольные значения пакета телеметрии. Способ выдачи команд определяет, будет ли действие выполняться автоматически или вручную конструктором бортовой аппаратуры. Для каждого испытания может быть настроено произвольное число команд.

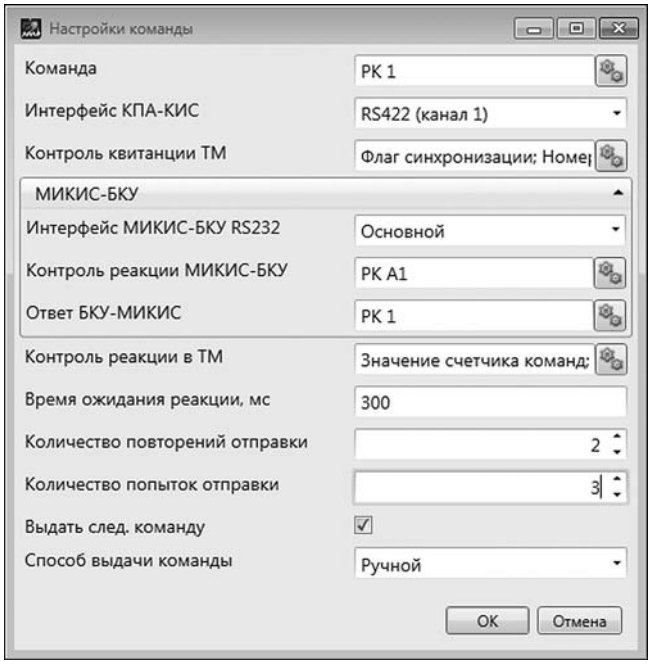


Рис. 4. Редактор настройки передачи команд

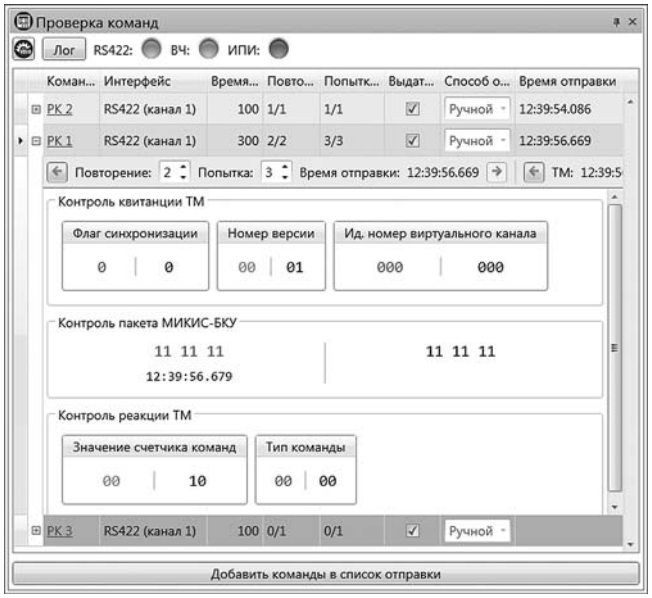


Рис. 5. Окно мониторинга передачи и отработки команд

Заданная последовательность команд передается в подсистему выполнения испытаний. Подсистема содержит программные имитаторы, которые передают команды в КИС, проводят анализ телеметрии в соответствии с алгоритмами работы оборудования и заданными периодами ожидания. КИС отрабатывает собственные алгоритмы функционирования, получая команды, анализируя, выполняя или передавая их в программное обеспечение, играющее роль имитатора бортового комплекса управления, формируя телеметрию и передавая её в имитатор наземного комплекса управления. Все передаваемые и получаемые пакеты данных, а также результаты их анализа визуализируются в окне мониторинга "Проверка команд", интерфейс которого показан на рис. 5. Окно мониторинга показывает заданные параметры, время отправки и получения реакции в телеметрии, а также контрольные значения. Цветовая индикация отображает состояние отправки и результаты отработки команд оборудованием. В случае нарушений работы испытываемого оборудования программное обеспечение получает некорректные данные и отображает обнаруженные ошибки в окне мониторинга. Разработанная схема визуализации позволяет быстро определять корректность контрольных точек, выделяя несовпадения элементов или выходы за граничные значения.

Окно мониторинга непрерывно обновляется, отображая текущее состояние испытательного процесса. Действия выполняются автоматически, но при необходимости конструктор может изменять последовательность команд, добавляя новые или отправляя ранее выполненные. Испытание в любой момент может быть остановлено и продолжено с выбранного места. Программное обеспечение ведёт журнал выполняемых действий, передаваемых и получаемых данных и может формировать отчёт по всем проводимым испытаниям.

Заключение. Разработанное программное обеспечение внедрено в программно-аппаратный комплекс, предназначенный для выполнения электрических высоко- и низкочастотных испытаний на предприятии — изготовителе спутниковых систем. Разработанные программные подсистемы обеспечивают наглядность построения сложных последова-

тельностей испытательных процедур, удобство и корректность отображения результатов и отвечают современным требованиям космического производства.

Использование программных имитаторов приёма-передачи команд и телеметрии расширяет возможности исследования бортовой аппаратуры и повышает качество и надёжность проводимых испытаний. Интеграция программных инструментов тестирования физических характеристик объекта контроля и методов анализа логики его функционирования позволяет проводить полнофункциональные испытания бортовой аппаратуры при непрерывном контроле телеметрии, представляющей информацию о реальном состоянии оборудования. Ориентация на работу с европейскими стандартами телекоманд и телеметрии делает разработанное программное обеспечение актуальным, востребованным и конкурентоспособным. Реализованный подход даёт возможность использовать программное обеспечение как инструмент исследователя для подготовки и апробации элементов испытательных процедур, а также для выполнения автоматизированных испытаний бортовой аппаратуры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Краевого государственного автономного учреждения "Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности".

Библиографические ссылки

1. **ГОСТ Р 53802—2010.** Системы и комплексы космические. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011. 28 с.

2. **Александровская Л.Н., Круглов В.И., Кузнецов А.Г.** Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем. М.: Логос, 2003. 736 с.

3. **Разработка** командно-измерительной системы для перспективных КА на базе платформы "Экспресс-4000". Методические указания. Железногорск, 2012.

4. **ISO/IEC 9646-1:** Information Technology — Open Systems Interconnection — Conformance testing methodology and framework. P. 1: General concepts, 1994. 46 p.

5. **ECSS-E-ST-10-03C.** Space engineering — Testing — European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2012. 128 p.

6. **ECSS-E-ST-10-02C.** Space engineering — Verification — European Cooperation for Space Standardization (ECSS), 2009. 45 p.

7. **ITU-T ITU-T** Recommendation Z.500 — Framework on formal methods in conformance testing, 1997.

8. **Garavel H.** OPEN/CSAR: An open software architecture for verification, simulation, and testing. Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998. P. 68—84.

9. **LabVIEW** function and VI reference manual. National Instruments Corporation, Austin, Texas, 1998.

10. **Tretmans J., Belinfante A.** Automatic testing with formal methods. Enschede: University of Twente, Centre for Telematics and Information Technology, 1999.

11. **Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В.** Бортовые системы управления космическими аппаратами. М.: МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.

12. **Раннев Г.Г.** Измерительные информационные системы. М.: Изд. центр "Академия", 2010. 336 с.

13. **Nozhenkova L., Isaeva O., Gruzenko E.** Computer Simulation of Spacecraft Onboard Equipment // Proceedings series Advances in Computer Science Research (ISSN 2352-538x). Vol. 18. 2015. P. 943—945, DOI: 10.2991/cisia-15.2015.

14. **Packet** Telecommand Standard ESA PSS-04-107. Iss. 2: European space agency (ESA), 1992. P. 166.

15. **Packet** Telemetry Standard ESA PSS-04-106. Iss. 1: European space agency (ESA), 1988. P. 73.

16. **Nozhenkova L., Isaeva O., Vogorovskiy R.** Automation of Spacecraft Onboard Equipment Testing // International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering (ISSN 2352-5401), 2016. P. 215—217. DOI: 10.2991/amsee-16.2016.57.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении,
а также непосредственно на сайте издательства
ООО «Инновационное машиностроение».

УДК 658.5

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

ОБОСНОВАНИЕ ГОРИЗОНТА ПЛАНИРОВАНИЯ ПРИ СОСТАВЛЕНИИ РАСПИСАНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Рассмотрено обоснование длительности горизонта планирования при составлении расписаний в автоматизированных корпоративных системах MES (Manufacturing Execution System) и APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) для машиностроения. Представлены методы определения горизонта планирования для различных производственных случаев. Доказано, что задача определения горизонта планирования на машиностроительном предприятии состоит из двух взаимосвязанных задач — для систем класса MES и APS. При этом проанализированы технологические маршруты методом критического пути в задачах для систем APS. Определены резервы времени, которые в дальнейшем используются при планировании в системах MES.

Ключевые слова: планирование в машиностроении; единица планирования; расписание; диаграмма Гантта; горизонт планирования; партия запуска.

The problem of justification of the duration of the planning horizon in scheduling automated corporate systems class MES (Manufacturing Execution System) and APS (Advanced Planning & Scheduling Systems) for engineering. The methods of determining the planning horizon for different industrial cases. It is proved that the problem of determining the planning horizon on the manufacture of machinery consists of two interrelated tasks — for MES class systems and systems for the class of APS. This technology analyzes the routes by the critical path in the APS for problems. Determined reserves of time, which are then used in planning in the MES.

Keywords: planning in mechanical engineering; unit of planning; schedule; Gantt chart; the planning horizon; party starts.

Введение и постановка задачи. Под горизонтом планирования θ в машиностроении понимается интервал времени, за который предполагается реализовать составленный план или программу по выпуску некоего множества номенклатуры единиц планирования. Под единицами планирования (ЕП) на множестве номенклатуры деталей $M(d_i, i = 1, ..., m)$ понимается множество единиц e_{ij} ($i = 1, ..., m$; $j = 1, ..., p_i$), где i — количество деталей, подлежащих изготовлению на множестве оборудования $N(N_k^c, c = 1, \ldots, C; k = 1, \ldots, n_c)$, где C — количество цехов; n_c — количество технологического оборудования в c-м цехе; p_i — количество технологических операций i-й детали с учётом того, что в любой ЕП учитывается величина запуска, т.е. длительность выполнения ЕП на оборудовании составляет $t_{e_{ij}} a_i$, где $t_{e_{ij}}$ — длительность операции по выполнению e_{ij}; a_i — величина партии запуска ЕП в производство, которая, как правило, не меняется во время технологического процесса (ТП).

При составлении расписаний как для всего предприятия (с помощью систем APS), так и для цехов (с помощь систем MES) часто возникает необходимость вычисления длительности горизонта планирования (ГП). В большинстве случаев планирование операций и определение ГП в машиностроении отличается от аналогичных задач в теории расписаний [1]. Планирование выпуска продукции на машиностроительных предприятиях с использованием корпоративных систем MES, APS, ERP (*Enterprise Resource Planning*) начинается с построения общего расписания для всех цехов предприятия с помощью систем APS [2]. В дальнейшем за выполнением расписаний для отдельных цехов (выполнение, пересчёт) отвечают системы MES. Требуется определить ГП при использовании систем как MES, так и APS.

Определение горизонта планирования в системах класса MES. Длительность ГП в MES-системах обычно выбирают в пределах от четырёх часов до трёх и более смен, но чёткого обоснования этому не существует. Рассмотрим более подробно эту задачу.

В MES-системах ГП определяют в зависимости от условий, приведённых ниже.

Условия для MES-систем.

1. Невозможность прерывания обработки ЕП с переносом на следующую смену (на горизонт планирования θ + 1). На рис. 1 показан случай, когда момент окончания выполнения (обработки) некой ЕП e_{131} $\left(\tau^{\text{КН}}_{\text{O}e_{131}}\right)$ превышает момент окончания текущего ГП $\tau^{\text{КН}}_{\theta}$ ($\tau^{\text{Н}}_{\theta}$ — момент начала текущего ГП) и окончание обработки ЕП e_{131} возможно только на следующем горизонте планирования θ + 1.

Заштрихованные участки на диаграмме Гантта (см. рис. 1) означают переналадку оборудования, затемнённые участки — выполнение других ЕП.

Такой вариант справедлив для случаев, когда обработка ЕП не может быть прервана по технологическим причинам, например, вследствие невозможности остановки непрерывного процесса движения инструмента вдоль обрабатываемой поверхности и необходимости продолжения этого процесса после остановки, что приводит к образованию ступеней на обрабатываемой поверхности и другим недостаткам, классифицируемым как брак. В этом случае все ЕП, выполнение которых по указанной выше причине является невозможным, удаляются из множества ЕП, подлежащих планированию на выбранном ГП.

2. Возможность прерывания обработки. Рассмотренный перенос выполнения ЕП возможен, если длительность выполнения количества деталей в партии больше единицы ($a > 1$), т.е. длительность выполнения ЕП не является непрерывной. На рис. 2 показан пример, где ЕП состоит из трёх деталей.

При этом две детали обрабатываются на ГП θ, а третья деталь — на ГП θ + 1. Таким образом, если на одинарном ГП θ появляется хотя бы одна ЕП, нарушающая его границы, то в случае, если длительности обработки этих ЕП не являются непрерывными ($a > 1$), целесообразно увеличить кратно длительность ГП. Если имеется предел кратности ГП, например не больше трёх рабочих смен, то ЕП, изготовление которых является непрерывным процессом и не укладывается в выбранный интервал ГП (на рис. 2 выбранный интервал ГП = 2θ), удаляются из множества ЕП, подлежащих планированию на выбранном интервале ГП.

3. Невозможность выполнения ЕП ввиду нарушения директивных сроков окончания.

Априори введём директивный момент окончания выполнения обработки для каждой ЕП — $\tau^{d}_{\text{O}e_{ij}}$ (этот показатель рассмотрим далее).

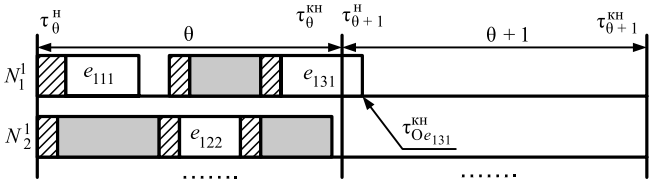


Рис. 1. Нарушение горизонта планирования

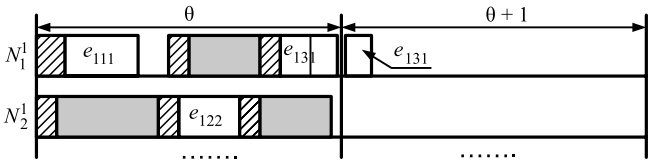


Рис. 2. Нарушение горизонта планирования с возможным переносом обработки

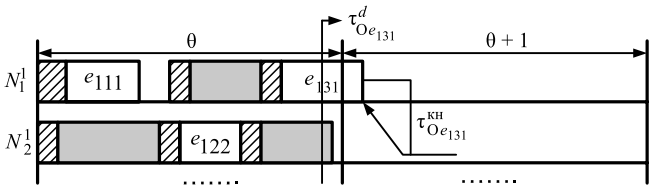


Рис. 3. Нарушение директивных моментов окончания обработки ЕП

Если на любом ГП в процессе построения расписания выявится, что хотя бы для одной ЕП не выполняется условие (рис. 3)

$$\tau^{\text{КН}}_{\text{O}e_{ij}} \leqslant \tau^{d}_{\text{O}e_{ij}}, \qquad (1)$$

то данная ЕП не может быть выполнена в текущем расписании. Если пересчёт расписания MES-системой не устранит эту проблему, то необходимо либо удалять эту ЕП и, скорее всего, изделие, в которое входит эта ЕП, из портфеля заказов предприятия, либо, что встречается чаще всего, переносить, согласовав с заказчиком сроки выпуска ЕП и изделия, на более поздние.

После согласования сроков выпуска вновь рассчитываются директивные моменты для рассматриваемых ЕП. И если проблема с неравенством (1) решена, то расчётный планграфик принимается к исполнению. В противном случае вновь возвращаются к процедурам согласования сроков выпуска.

Таким образом, для MES-систем можно сформулировать общее правило для обоснования длительности ГП: при ГП для MES-систем необходимо учитывать приведённые выше условия 1 и 2. Если для выбранного ГП на множестве ЕП выполняется неравенство (1), то ГП удовлетворяет условиям планирования.

Отметим, что часто ГП используется как некая граница во времени при оценке какой-либо системы планирования с точки зрения максимизации загрузки оборудования, т.е. на любом произвольно выбранном ГП для разных систем, как правило, с учётом одних и тех же данных составляют расписание и чисто символический приоритет приобретает та система, которая на данном ГП получит более высокий процент загрузки оборудования. К реальной действительности это не имеет отношения, поскольку в данном случае не учитываются условия, рассмотренные выше, и правила обоснования ГП.

Определение ГП в системах APS. Системы APS предназначены для составления расписания работы всего парка оборудования N (N_k^c, $c = 1, ..., C$; $k = 1, ..., n_c$), после чего становятся известными частные расписания для всех цехов. Теоретически, без учёта неизбежного простоя оборудования по различным причинам, ГП на всём множестве номенклатуры выпуска предприятия M (d_i, $i = \overline{1,m}$) в общем случае определяют следующим образом:

$$\theta^{\Sigma} = \max\left(\sum_{j=1}^{p_i} a_i\left(t_{\text{ПЕР}e_{ij}} + t_{\text{ТР}e_{ij}} + t_{\text{О}e_{ij}}\right) + t^{\Sigma}_{\text{ПР}e_{ij}}\right), \quad (2)$$

$i = 1, \ldots, m,$

где $t_{\text{ПЕР}e_{ij}}$ — время переналадки оборудования при поступлении ЕП e_{ij}; $t_{\text{ТР}e_{ij}}$ — время, которое затрачивается на транспортные операции для ЕП e_{ij}; $t_{\text{О}e_{ij}}$ — время обработки партии ЕП e_{ij}; $t^{\Sigma}_{\text{ПР}e_{ij}}$ — суммарное время пролёживания ЕП e_{ij} по различным причинам; p_i — количество технологических операций ЕП e_{ij}.

Чтобы получить истинные значения многих параметров, необходимо на множестве M построить с помощью системы APS общее расписание и в дальнейшем представить его в виде многополюсной сети (рис. 4).

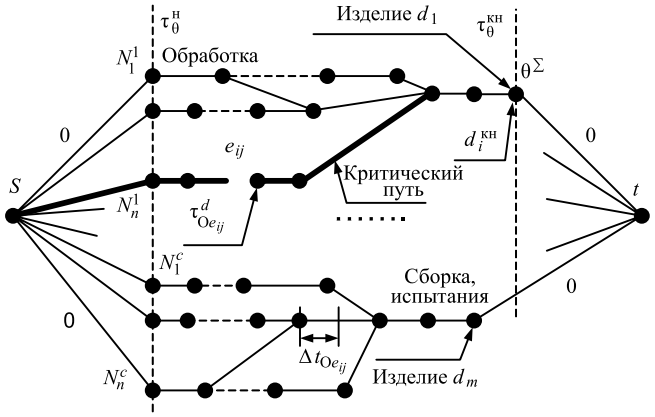


Рис. 4. Сетевая интерпретация программы выпуска, полученная по результатам расписания

В сеть включены фиктивные вершины S и t с нулевыми значениями переходов. В данной сети в перечень операций входят все виды, включая операции обработки, сборочные, испытательные и другие, предшествующие окончательному формированию изделия. Вершины означают ЕП, отрезки между ними — времена выполнения ЕП:

$$t_{e_{ij}} = a_i\left(t_{\text{ПЕР}e_{ij}} + t_{\text{ТР}e_{ij}} + t_{\text{О}e_{ij}}\right) + t^{\Sigma}_{\text{ПР}e_{ij}}. \quad (3)$$

Каждая законченная ветвь на сети означает изделие d_i ($i = \overline{1,m}$) из портфеля заказов M. Последняя вершина каждого изделия d_i определяет момент окончания его изготовления $d_i^{\text{КН}}$. Относительно заданного начала ГП $\tau_\theta^{\text{Н}}$ получается искомый конец ГП для всего множества номенклатуры выпуска $\tau_\theta^{\text{КН}}$.

После построения расписания и сети необходимо сравнить полученные моменты окончания выполнения изделий $d_i^{\text{КН}}$ с теми, которые ожидает или регламентирует заказчик d_i^3. При этом должно выполняться условие

$$d_i^{\text{КН}} \leqslant d_i^3, \quad i = 1, \ldots, m. \quad (4)$$

Если условие (4) для какого-либо изделия d_i не выполняется, то либо выполняют пересчёт расписания в целях поиска лучшего решения, либо сроки согласовывают с заказчиком. Отметим, что в силу NP-сложности задач расписания ни одна из существующих APS-систем не обладает алгоритмом, позволяющим получать оптимальные расписания. Поэтому рекомендуется процедура согласования сроков.

В результате построения расписания и сети предварительно становятся известными директивные моменты окончания выполнения для всего множества ЕП — $\tau^d_{\text{О}e_{ij}}$.

В дальнейшем необходимо проанализировать каждую ветвь $S \to d_i \to t$ (общая сеть содержит m таких ветвей) методом критического пути (МКП) [3] при полученных значениях $d_i^{\text{КН}}$. При этом для каждой ветви $S \to d_i \to t$ находится критический путь (КП) (на рис. 4 обозначен утолщённой линией). Единицы планирования, лежащие на этом пути, не имеют резервов времени, и поэтому при пла-

нировании в MES-системах ЕП, лежащие на КП, имеют директивные моменты окончания $\tau^{d}_{Oe_{ij}}$, не подлежащие увеличению, что должно быть учтено при возможных пересчётах цеховых расписаний в MES-системах.

Кроме того, в результате анализа для каждой ЕП, не лежащей на КП, становятся известными резервы времени $\Delta t_{Oe_{ij}}$, которые могут быть использованы при пересчёте расписаний в MES-системах (см. рис. 4).

После анализа подсетей $S \to d_i \to t$ общий ГП корректируется и все частные расписания со значениями моментов окончания $\tau^{d}_{Oe_{ij}}$ как для КП, так и для остальных путей подсетей $S \to d_i \to t$, а также резервами времени $\Delta t_{Oe_{ij}}$ передаются в базы данных цеховых MES-систем.

Заключение. Таким образом, показано, что задача определения ГП на машиностроительном предприятии состоит из двух взаимосвязанных задач (для систем MES и APS); для определения ГП в MES-системах необходимо использовать ряд условий, связанных с возможностью прерывания работ во времени, и ненарушения директивных сроков окончания выполнения ЕП; задача определения ГП для APS-систем заключается в последовательности операций: построение общего расписания, а также общей сети, интерпретирующей данное расписание в виде совокупности подсетей по количеству изделий, и их анализу по МПК, в котором выявляются критические пути для всех изделий, не имеющие резервов времени, директивные моменты окончания для ЕП, лежащих на КП, и резервы времени для остальных путей. Данные этого анализа являются директивными для MES-систем.

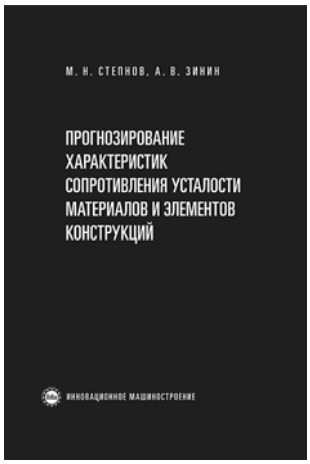
Библиографические ссылки

1. **Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струсевич В.А.** Теория расписаний. Многостадийные системы. М.: Наука, 1989, 328 с.

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

3. **Филлипс Д., Гарсиа-Диас А.** Методы анализа сетей: пер.с англ. М.: Мир, 1984, 496 с.

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



Степнов М.Н., Зинин А.В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

М.: Инновационное машиностроение, 2016. 392 с.

ISBN 978-5-9907308-0-9

Монография содержит систематическое изложение существующих расчетных методов оценки характеристик сопротивления усталости традиционных конструкционных и новых композитных материалов на основе полимерной матрицы, а также методов расчета выносливости типовых элементов высоконагруженных конструкций.

Методология расчетных методов определения характеристик выносливости основана на использовании статистических данных о характеристиках механических свойств материалов при кратковременном нагружении и экспериментально обоснованных моделей учета влияния различных факторов на несущую способность конструкций при циклическом нагружении. Показано, что применение предлагаемых расчетных методов обеспечивает достаточно высокую точность оценки характеристик сопротивления усталости, не уступающую показателям точности экспериментальных исследований. Особое внимание уделено вопросам возможности оценки характеристик усталости полимерных композитных материалов в зависимости от их структурных параметров и особенностей механического поведения и механизмов усталостного разрушения.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторских и технологических бюро, лабораторий механических испытаний, научных сотрудников, аспирантов и студентов механических специальностей.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru