Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издаётся с 1947 г.

Том 73

6
2019

Главный редактор

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

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

Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

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

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

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

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

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

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

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

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

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

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

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Шибанов Г.П. Диагностика неисправностей приборного оборудования 282

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 288

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

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

It is published since 1947

Volume 73 6 2019

Chief in Editor

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

EDITORIAL COUNCIL:

Afanasyev V.N. – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE
Basarab M.A. – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Bolshakov A.A. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Buldakova T.I. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Wang Meiling – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Zinchenko L.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Clark R. – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK
Krioni N.K. – dr.en.s., prof., USATU, Ufa
Kuznetsov A.E. – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan
Maltseva S.V. – dr.en.s., prof., NRU HSE
Mikaeva S.A. – dr.en.s., prof., MSUPI
Neusypin K.A. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Nefedov E.I. – dr.ph.-m.s., IRE RAS
Nikiforov V.M. – dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP behalf of N.A. Pilyugin»
Proletarskiy A.V. – dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman
Protalinsky O.M. – dr.en.s., prof., NRU MPEI
Putilov V.N. – LLC «Innovative Mashinostroenie» Publishers (deputy chief editor)
Rumyantseva O.N. – General Director of LLC «Innovative Mashinostroenie» Publishers
Xia Yuantsin – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China
Fu Li – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China
Fedorov I.B. – dr.en.s., prof., academician RAS, President of MSTU behalf of N.E. Bauman
He Yung – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science and Technology, P.R. China
Chistyakova T.B. – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)
Shakhnov V.A. – dr.en.s., prof., corr. member of RAS, MSTU behalf of N.E. Bauman
Shibanov G.P. – dr.en.s., prof., State Flight Test Center behalf of V.P. Chkalov

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

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

Founder:

LLC «"INNOVATIVE MASHINOSTROENIE" PUBLISHERS»

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

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Shalumov A.S., Shalumov M.A. ASONIKA-R: automatic filling of the operating modes maps for electrical radio products 243

Shcherbatov I.A. The choice of the way to achieve a global goal in the management systems of energy enterprises maintenance . . 252

Akulov P.A., Petreshin D.I. Automation of the control test operation of electrical connectors 257

Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Verchenko A.V. Optimization of the sheet metal abrasive water jet cutting process 263

Kulikov I.N., Kolesnik L.L. The productivity increasing of the operating multi-cluster technological complex through the use of simulation modeling of semi-finished product flows 269

MODERN TECHNOLOGIES

Savin S.I., Vorochaeva L.Yu. Motion control of walking robot with elastic links by means of optimizing the trajectory 272

Kirin Yu.P., Tikhonov V.A. Identification of the functioning situations for uncertain dynamic objects in two-position regulation systems 277

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Shibanov G.P. Diagnosing of instrument equipment faults 282

REVIEW OF THE PERIODICAL PRESS

On the journals pages 288

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

УДК 621.396.6.019.3

А.С. Шалумов, д-р техн. наук, проф., **М.А. Шалумов,** канд. техн. наук
(Научно-исследовательский институт «АСОНИКА»)
ALS140965@mail.ru

АСОНИКА-Р: АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ КАРТ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОРАДИОИЗДЕЛИЙ

Рассмотрен программный комплекс АСОНИКА-Р, предназначенный для автоматизированного заполнения карт рабочих режимов электрорадиоизделий (ЭРИ): интерфейс программы, особенности работы с картами рабочих режимов, ввод формул для параметров ЭРИ, пример передачи электрических параметров из программы расчёта электрических схем PsPice в программу АСОНИКА-Р. Приведён список всех возможных карт рабочих режимов. Рассмотрена возможность экспорта данных из АСОНИКА-Р в АСОНИКА-Б. Приведён перечень электрических параметров ЭРИ для наиболее востребованных карт рабочих режимов.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; электрорадиоизделие; параметры электрорадиоизделий; карты рабочих режимов.

The software package ASONIKA-R, designed for the automated filling of operating mode maps for electrical radio products (ERP); the interface program, features of working with operating mode cards, formulas input for ERP parameters, an example of transferring electrical parameters from the program for calculating electrical circuits PsPice to the ASONIKA-P program. A list of all possible operating mode maps is adduced. The possibility of exporting data from ASONIKA-R to ASONIKA-B is considered. The electrical parameters specification of the ERP for the most demanded maps of operating modes is adduced.

Keywords: radiotechnical device; electrical radio product; parameters of electrical radio products; maps of operating modes.

Подсистема АСОНИКА-Р [1—4] разработана и рекомендуется для применения в соответствии с документом «Руководство по оценке правильности применения электрорадиоизделий в аппаратуре специального назначения. Часть 1. Общие положения. Карты рабочих режимов и условий применения электрорадиоизделий».

После проверки правильности применения электрорадиоизделий (ЭРИ) в аппаратуре получают данные о результатах оценки номенклатуры, условий эксплуатации, электрических и температурных режимов работы ЭРИ. Эти данные в виде числовых значений параметров, характеризующих фактические и требуемые по нормативно-технической документации (НТД) на ЭРИ условия их эксплуатации и режимы работы, оформляют в виде карт рабочих режимов (КРР).

Комплект КРР на сборочную единицу высшей ступени, в которую входят сборочные единицы низших ступеней, включает в себя:

титульный лист (формы 1 и 1а);

содержание (формы 2 и 2а);

перечень комплектов карт сборочных единиц низшей ступени (форма 3);

карту оценки номенклатуры применённых ЭРИ и сведений о соответствии условий их эксплуатации и показателей надёжности требованиям НТД (форма 4);

карту ЭРИ, применённых при механических воздействиях, не соответствующих требованиям НТД на них (форма 5);

карты режимов работы ЭРИ, входящих непосредственно в состав комплекта КРР (формы 6...87), например соединителей, тумблеров и т. п.

В комплект КРР на сборочную единицу низшей ступени, не имеющей в своем составе другой сборочной единицы (например, ячейку, типовой элемент замены и т. п.), входят:

титульный лист (форма 1а);

содержание (форма 2а);

карта оценки номенклатуры применённых ЭРИ и сведения о соответствии условий их

эксплуатации и показателей надёжности требованиям НТД (форма 4);

карта ЭРИ, применённых при механических воздействиях, не соответствующих требованиям НТД на них (форма 5);

карты режимов работы ЭРИ, входящих в состав сборочной единицы (формы 6...87).

По согласованию с представителем заказчика допускается формы 4 и 5 не включать в комплект карт сборочных единиц низших ступеней. В этом случае при заполнении указанных форм для сборочной единицы высшей ступени в них необходимо включить все ЭРИ, входящие в сборочные единицы низших ступеней.

Комплект КРР в окончательном виде представляется разработчиком аппаратуры на стадии разработки рабочей документации (по результатам испытаний опытного образца). Возможно составление КРР на более ранних стадиях разработки аппаратуры с помощью проведения расчётов по схемам или по результатам инструментальных измерений на макетах с последующей их корректировкой (по результатам измерений в опытном образце). Этап, на котором составляется КРР, согласовывается с заказчиком аппаратуры.

АСОНИКА-Р предназначена для облегчения и ускорения процесса заполнения карт рабочих режимов ЭРИ. В программу заложены все возможные формы КРР последней редакции.

АСОНИКА-Р имеет необходимую базу данных, где находится информация о предельных значениях параметров ЭРИ, взятая из НТД. После задания пользователем перечня ЭРИ программа автоматически заносит информацию для каждого ЭРИ из базы данных в карты режимов, в колонки «По НТД». При этом при вёрстке карты автоматически осуществляется сравнение значений параметров, находящихся в колонке «В схеме», со значениями, находящимися в колонке «По НТД» (кроме формы 4 «Карта оценки номенклатуры ЭРИ и сведений о соответствии условий их эксплуатации и показателей надёжности требованиям НТД»). Значения параметров в колонке «В схеме» выделяются красным цветом, если они превышают соответствующие значения параметров в колонке «По НТД». В базу данных могут вводиться как числовые значения параметров в виде констант, так и табличные, графические и функциональные зависимости параметров по НТД от параметров, приведённых в колонке «В схеме» (например, от температуры окружающей среды).

Результаты работы — заполненные карты режимов ЭРИ — автоматически конвертируются программой в текстовый процессор WORD (версии 2000 и более поздние), где они могут быть отредактированы и распечатаны в форматах А3 и А4.

Перечень ЭРИ, для которых нужно получить КРР, может быть введён как вручную пользователем, так и путём конвертирования из выходных файлов системы P-Cad, PCAD, в редакторе ilp-файлов (IlpEditor), в Microsoft Excel и других системах, например АСОНИКА-ТМ.

Кроме того, конвертация перечней ЭРИ из любой системы может осуществляться в рамках интегрированной информационной среды предприятия (PDM-системы) через промежуточный текстовый файл (формат ilp). Возможен экспорт параметров ЭРИ в АСОНИКА-Б.

АСОНИКА-Р может использоваться как на одном рабочем месте, так и в сетевом варианте, когда база данных установлена на сервере, а на рабочих местах установлена управляющая программа. При этом редактировать базу данных может только администратор базы.

АСОНИКА-Р используется для проведения контроля за правильностью применения изделий электронной техники в аппаратуре. Рекомендуется для применения в процессе проектирования и замены испытаний на ранних этапах проектирования.

Основное окно АСОНИКА-Р содержит пункты «Проект», «Правка», «Настройка», «Выполнить», «Справка». Рассмотрим интерфейс и основные возможности АСОНИКА-Р.

Пункт меню «Проект», *команда «Свойства»*, используется для задания индекса изделия, для которого формируются КРР. Также возможно задать значение коэффициента нагрузки (глобальный, общий параметр для всего проекта), если необходимо. Этот параметр будет доминировать при расчёте коэффициентов нагрузки в различных картах.

Пункт меню «Проект», *команда «Создание ilp-файла из файла *.xlsx»*, позволяет сформировать на основе .xlsx-файла .ilp-файл. При выборе этого пункта в режиме импорта запускается редактор ilp-списков, в котором следует провести импорт файла .xlsx. Данный редактор является дополнительным инструментом к системе АСОНИКА.

Пункт меню «Проект», *команда «Импорт»*. В АСОНИКА-Р можно использовать разные варианты импорта: «Файл АСОНИКА-Р» (чтение файла, созданного АСОНИКА-Р,

при этом к текущему проекту будут добавлены ЭРИ из импортируемого проекта), «Файл АСОНИКА-ТМ» (чтение файла АСОНИКА-ТМ, данный вариант импорта используется для создания нового проекта, в новый проект АСОНИКА-Р добавляются выбранные ЭРИ из проекта АСОНИКА-ТМ), «Файл списка (*.ilp)» (чтение файла с расширением *.ilp, данный вид импорта так же, как и импорт файла АСОНИКА-ТМ, используется для создания нового проекта АСОНИКА-Р).

Импорт текстовых файлов позволяет проставлять у совпадающих ЭРИ значения для параметров столбца «В схеме». АСОНИКА-Р осуществляет импорт значений температур и ускорений (гармоническая вибрация, однократный и многократный удар, случайная вибрация), полученных в АСОНИКА-ТМ, а также электрические характеристики — токи, напряжения, мощности, рассчитанные в специальных программах электрического анализа (OrCad, Altium Designer и др). Перечислим возможные случаи импорта текстовых файлов:

«Файл температур» (чтение текстового файла, содержащего температуры ЭРИ (создается в АСОНИКА-ТМ). В ходе импорта у всех совпадающих ЭРИ значения температур проставляются в столбце «В схеме», после чего можно формировать формы);

«Файл ускорений (гармоническая вибрация, однократный, многократный удар (*.txt))» (чтение текстового файла, содержащего ускорения ЭРИ (создаётся в АСОНИКА-ТМ));

«Файл ускорений (случайная вибрация (СВ.txt))» (чтение текстового файла, содержащего ускорения ЭРИ после расчёта на случайную вибрацию (создаётся в АСОНИКА-ТМ));

«Файл электрических характеристик (.txt)» (чтение текстового файла, содержащего токи, напряжения, мощности, рассчитанные в специальных программах электрического анализа (OrCad, Altium Designer и др.)).

Пункт меню «Проект», *команда «Экспорт»*. АСОНИКА-Р позволяет осуществить экспорт ЭРИ в виде файлов .ilp и .txt. Файл формата .txt позволяет подготовить файл с ЭРИ для АСОНИКА-Б. Чтобы это сделать, достаточно открыть проект АСОНИКА-Р, выбрать пункт меню «Проект-Экспорт-Файл АСОНИКА-Б (*.TXT)», и система сформирует файл. Аналогично можно создать файл списка (*.ilp).

Пункт меню «Правка», *команда «Добавить форму»*. Для удобства пользователя в окне добавления формы имеется поиск, используя который и зная номер формы, можно легко найти её название.

Пункт меню «Правка», *команда «Редактировать список ЭРИ»*. При выборе команды запустится окно редактирования формы. В открывшемся окне помимо ЭРИ и их полных условных записей имеется нумерация, а слева расположены кнопки редактирования:

«Добавить ЭРИ из БД»;

«Добавить ЭРИ» (вручную необходимо ввести позиционное обозначение и полную запись);

«Удалить ЭРИ»;

«Очистить список формы» (используется для удаления всех данных из списка);

«Изменить ЭРИ» (используется для редактирования позиционного обозначения и полной условной записи ЭРИ);

«Копировать ЭРИ» (используется, если необходимо добавить ЭРИ, полная условная запись которого уже есть в списке ЭРИ формы);

«Копировать ЭРИ списком» (используется для копирования ЭРИ списком со всеми параметрами в новые ЭРИ);

«Групповое удаление ЭРИ» (позволяет удалить несколько ЭРИ, следующих по порядку; нужно указать обозначение ЭРИ, а также диапазон индексов (через «-» и «,»), которые нужно удалить);

«Групповое задание параметров для выделенных элементов» (позволяет задать нескольким ЭРИ одинаковые параметры в столбце «В схеме»);

«Групповое задание параметров для всех элементов» (позволяет задать (заменить на заданные) параметры столбца «В схеме» у всех ЭРИ);

«Параметры ЭРИ» (используется для задания любого из параметров ЭРИ).

Пункт меню «Правка», *команды «Сформировать Форму 4» и «Сформировать Форму 5»*.

Форма 4 — карта оценки номенклатуры применённых ЭРИ и сведений о соответствии условий их эксплуатации и показателей надёжности требованиям НТД.

Форма 5 — карты ЭРИ, применённых при механических воздействиях, не соответствующих требованиям НТД на них.

Данные формы не добавляются в проект, как все остальные карты, их нужно автоматически формировать.

После формирования данных форм выдаются сообщения о том, что они сформированы. После чего эти формы появляются в списке форм.

Пункт меню «Правка», *команда «Условия эксплуатации»*. Чтобы данный пункт стал ак-

тивным, необходимо сначала сформировать форму 4, так как условия эксплуатации участвуют в её формировании. Далее следует нажать «Условия эксплуатации» в пункте меню «Правка». Появится окно для их заполнения.

Пункт меню «Настройка», *команда «Параметры редактирования форм».* Имеются три варианта сортировки: «отсутствует», «по обозначению», «по описанию». Выбранные параметры сортировки действуют и при добавлении формы в список. Также в диалоговом окне «Параметры редактирования форм» можно флажками выбрать следующие возможности.

Если поле «Возможность редактирования параметров НТД для ЭРИ» активно, то при редактировании параметров ЭРИ, полная условная запись которого содержится в справочной базе данных, можно будет изменять значения параметров по НТД для текущего проекта.

Если поле «Всегда рассчитывать значение параметра» активно, то при формировании формы значения параметров ЭРИ, для которых в базе данных определена формула или зависимость, будут рассчитываться. Также при формировании формы для рассчитываемого параметра в ячейке таблицы будет отображено рассчитанное значение, а рядом в скобках будет указан параметр, который участвовал в расчёте.

Пункт меню «Выполнить» состоит из следующих команд:

Команда «Верстать форму» позволяет сформировать выделенную форму в формате Word, согласно установленным настройкам.

Команда «Верстать все формы» позволяет сформировать все формы проекта в формате Word, согласно установленным настройкам.

Команда «Соответствие НТД» отвечает за формирование формы с элементами, не соответствующими НТД.

Есть некоторые особенности работы с формами. Формы (КРР) 1...3 связаны с титульным листом, оглавлением документа, перечнем сборочных единиц. Перед созданием форм следует определиться с тем, какой комплект карт (высшей или низшей ступени) нужен. Если идёт работа с высшей ступенью, то в проект добавляются формы 1 и 2, если с низшей, то 1а и 2а, форма 3 используется для работы с низшей ступенью.

Формы 63, 64, 64а, 64б, 65, 66, 83, 84 описывают микросхемы по функциональному назначению. В их состав входят такие параметры, как номера выводов цепей питания, а также номера входных и выходных цепей. Иногда в микросхемах может быть большое число входных и выходных цепей, а также цепей, связанных с питанием. При составлении форм цепи заранее группируют по принадлежности к цепям питания, входным и выходным цепям для каждой микросхемы. Это позволяет обобщить анализ значений параметров «По НТД» и «В схеме» для определённой группы выводов, не формируя значения для каждого вывода (достаточно трудоёмко при формировании КРР).

Перед созданием форм для удобства рекомендуется настроить параметры редактирования. Для варианта сортировки необходимо выбрать параметр «По обозначению».

Для того чтобы добавить форму, следует на панели инструментов нажать кнопку «+» (можно воспользоваться пунктом меню «Правка»). В результате появится окно, показанное на рис. 1. Далее необходимо выбрать нужную форму и нажать на кнопку «Принять». Форма появится в списке форм. Рассмотрим особенности работы с указанными формами.

Существует возможность ввода формул для параметров ЭРИ. Для того чтобы посмотреть, как работают формулы, нужно в вызванном из меню диалоговом окне «Настройка» командой «Параметры редактирования форм» в параметрах редактирования снять флажок с пункта «Всегда рассчитывать значение параметров».

Проиллюстрируем работу с формулами на примере коэффициента нагрузки в диодах. Для этого нужно открыть проект с формой 55. В форме 55 выбрать диод (рис. 2). В пункте 10 «Коэффициент нагрузки» можно ввести значения вручную либо задать формулу в столбцах как «В схеме», так и «По НТД». Первоначально формула для данного параметра столбца

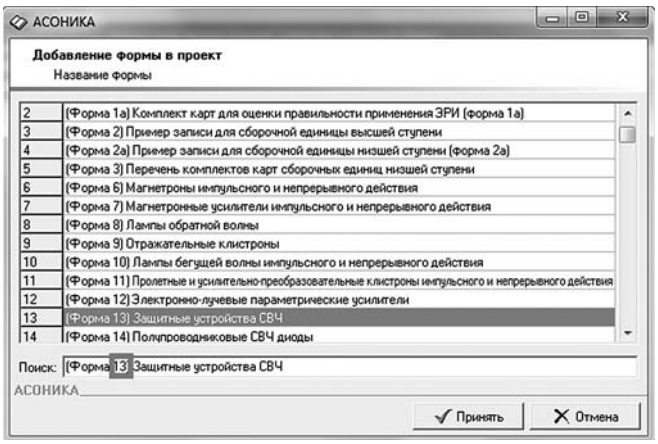


Рис. 1. Окно добавления формы в проект

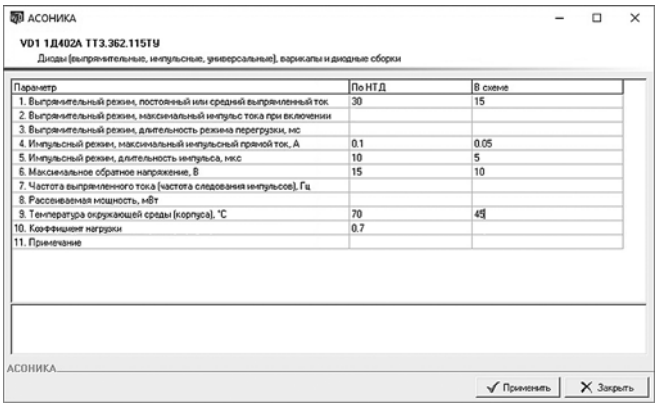


Рис. 2. Редактирование параметров диода

«В схеме» была задана в АСОНИКА-БД следующим образом: (= SS\f(@1;#1) = @1/#1), где f(@1;#1) означает, что формула использует значения параметра 1 столбцов «В схеме» и «По НТД»; @1/#1 — отношение параметра 1 столбца «В схеме» к параметру 1 столбца «По НТД». Аналогичные формулы можно ввести для параметра и в АСОНИКА-Р как для значений столбцов «По НТД», «В схеме», так и для обоих значений. Рассмотрим эти варианты.

В рассматриваемом примере символ SS означает, что расчёт выполняется только для столбца «В схеме». Отчёт для данной формы представлен на рис. 3. Видно, что в столбце «В схеме» содержится результат расчёта по формуле для параметра коэффициент нагрузки. Аналогичный результат будет, если сделать активным пункт в параметрах редактирования «Всегда рассчитывать значение параметров».

Коэффициент нагрузки для столбца «В схеме» можно ввести вручную (например, 4). Для расчёта параметра коэффициент нагрузки по НТД по формуле формулу нужно ввести в соответствующую ячейку. Вид формулы изменится: = SN\f(@1;#1) = @1/#1.

Если требуется рассчитать значение параметра коэффициент нагрузки для столбцов «По НТД» и «В схеме», используя формулы, то данные формулы нужно ввести в соответствующие ячейки. Вид формул изменится для столбцов «По НТД» и «В схеме»: = S0\f(@1;#1) = @1/#1.

В АСОНИКА-Р существует возможность считывать электрические параметры ЭРИ, полученные с помощью программ расчёта электрических режимов работы ЭРИ. Так, в программе PsPice проведён расчёт электрической схемы и с помощью конвертора получен файл log.txt, имеющий следующее содержание:

```
R1: 0,7104 0,7544 5,7E-5 0,000455
R10: 3,582 3,582 0,012831 0,102646
R2: 3,358 3,403 0,000289 0,002316
R3: 1,008 2,269 0,002859 0,022872
R4: 1,434 2,8615 4,1E-5 0,000328
R5: 2,904 3,732 0,00774 0,061921
R6: 0,7102 1,225 0,00015 0,0012
R7: 0,573 0,584 0,000341 0,002728
R8: 0,573 0,5841 0,000341 0,002729
R9: 0,739 1,2539 7,9E-5 0,000629
VT1: 2,846 2,35 0,496 0,00056 1,3E-5 0,000278 0,00066 0,001321
VT2: 2,096 1,434 0,662 0,001606 7E-6 0,001063 0,039507 0,079014
VT3: 1,418 0,739 0,679 0,003545 3,7E-5 0,002407 0,002518 0,005037
VD1: 1,418 0,739 0,679 0,003545 3,7E-5 0,002407 0,002518 0,005037
C1: 5 5 0 0
C10: 1,146 1,168 353849,5 11794,983333
C11: 1,9853 1,9857 0,098664 0,003289
C12: 0,4576 0,4576 2,9E-5 1E-6
C13: 0,2214 0,2935 0,008317 0,000277
C2: 0,9316 0,9316 4,8E-5 2E-6
C3: 3,582 3,582 0,012655 0,000422
C4: 5 5 0 0
C5: 3,33 3,3304 0,000875 2,9E-5
C8: 3,358 5,314 1171943 39064,766667
C9: 0,496 0,518 153324,5 5110,816667
```

Форма 55

Карта рабочих режимов диодов (выпрямительных, импульсных, универсальных), варикапов и диодных сборок

Позиционное обозначение			VD1					
Наименование изделия			1Д402А ТТ3.362.115ТУ					
Режим работы			В схеме	По НТД	В схеме	По НТД	В схеме	По НТД
Выпрямительный режим	постоянный или средний выпрямленный ток, мА	1	15	30				
	максимальный импульс тока при включении, А	2						
	длительность режима перегрузки, мс	3						
Импульсный режим	максимальный импульсный прямой ток, А	4	0.05	0.1				
	длительность импульса, мкс	5	5	10				
Максимальное обратное напряжение, В		6	10	15				
Частота выпрямленного тока (частота следования импульсов), Гц		7						
Рассеиваемая мощность, мВт		8						
Температура окружающей среды (корпуса), °С		9	45	70				
Коэффициент нагрузки		10	5.00E-01(1)	0.7				
Примечание		11						

Рис. 3. Отчёт для формы 55. Коэффициент нагрузки рассчитывается для «схемы»

Электрические параметры в АСОНИКА-Р считываются файлом ERIModes5.ini. Содержание этого файла следующее:

```
35 3 1 6
55 1 2 6 10
58 1 2 3 4 5 17 18 20
67 1 3 9 14
68 1 3 13 15
```

Здесь 1-й столбец — номер формы (например, 68 — резисторы); 2-й столбец — число передаваемых электрических параметров; 3-й и последующие столбцы — передаваемые параметры.

Параметры для формы 55 (диоды):

1 — выпрямительный режим, постоянный или средний выпрямленный ток, мА;

2 — выпрямительный режим, максимальный импульс тока при включении, А;

6 — максимальное обратное напряжение, В;

10 — коэффициент нагрузки.

Параметры для формы 58 (транзисторы биполярные):

1 — статический режим, напряжение коллектор—эмиттер, В;

2 — статический режим, напряжение коллектор—база, В;

3 — статический режим, напряжение эмиттер—база, В;

4 — статический режим, ток коллектора, А;

5 — статический режим, ток базы, А;

17 — средняя мощность, Вт;

18 — импульсная мощность, Вт;

20 — коэффициент нагрузки;

Параметры для формы 67 (конденсаторы):

1 — напряжение постоянное, В;

3 — напряжение импульсное, В;

9 — реактивная мощность, Вар;

14 — коэффициент нагрузки.

Параметры для формы 68 (резисторы):

1 — напряжение постоянное, В;

3 — напряжение импульсное, В;

13 — суммарная мощность, Вт;

15 — коэффициент нагрузки.

Рассмотрим последовательность действий для примера. Создадим проект в АСОНИКА-Р с теми же ЭРИ, что и в импортируемом файле, и осуществим импорт файла log.txt. Пример иллюстрируют рис. 4, 5.

В результате для параметров ЭРИ форм (которые совпадают с ЭРИ в файле log.txt) в столбец «В схеме» будут проставлены значения из импортируемого файла.

Перечень карт рабочих режимов приведён в табл. 1.

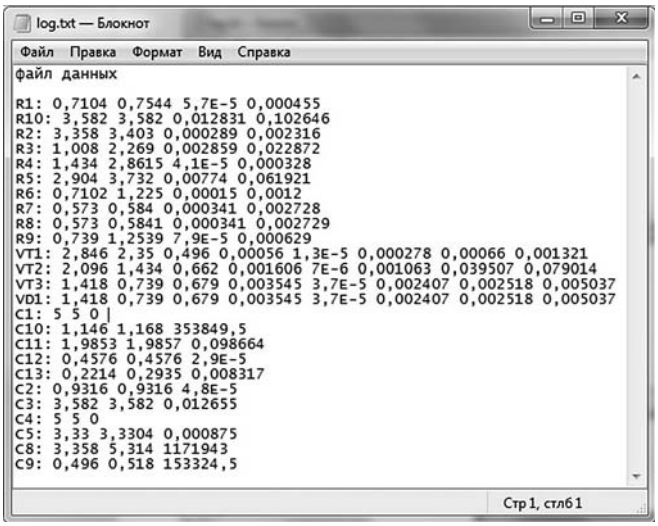


Рис. 4. Содержание файла log.txt

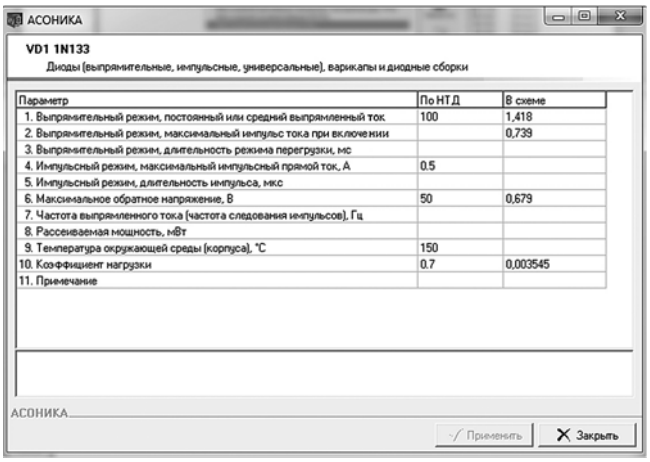


Рис. 5. Загруженные в диоды данные

Таблица 1

Перечень карт рабочих режимов

Номер карты	Описание
1	Титульный лист для комплекта карт для оценки правильности применения ЭРИ (шифр сборочной единицы высшей ступени)
1а	Титульный лист для комплекта карт для оценки правильности применения ЭРИ (шифр сборочной единицы низшей ступени)
2	Содержание комплекта карт для оценки правильности применения ЭРИ для сборочной единицы высшей ступени
2а	Содержание комплекта карт для оценки правильности применения ЭРИ для сборочной единицы низшей ступени
3	Перечень комплектов карт сборочных единиц низшей ступени
4	Карта оценки номенклатуры ЭРИ и сведений о соответствии условий их эксплуатации и показателей надёжности требованиям НТД

Продолжение табл. 1

Номер карты	Описание
5	Карта ЭРИ, применённых при механических воздействиях, не соответствующих требованиям НТД
6	КРР магнетронов импульсного и непрерывного действия
7	КРР магнетронных усилителей импульсного и непрерывного действия
8	КРР ламп обратной волны
9	КРР отражательных клистронов
10	КРР ламп бегущей волны импульсного и непрерывного действия
11	КРР пролётных и усилительно-преобразовательных клистронов импульсного и непрерывного действия
12	КРР электронно-лучевых параметрических усилителей
13	КРР защитных устройств СВЧ
14	КРР полупроводниковых СВЧ-диодов
15	КРР ВЧ- и СВЧ-транзисторов
16	КРР полупроводниковых параметрических усилителей и усилителей на туннельных диодах
17	КРР генераторов и усилителей на диодах Ганна
18	КРР генераторов шума СВЧ и генераторов на лавинно-пролётных диодах
19	КРР приёмных и передающих СВЧ
20	КРР полупроводниковых фазовращателей, переключателей, аттенюаторов и модуляторов
21	КРР ферритовых циркуляторов, вентилей, переключателей и ограничителей
22	КРР полупроводниковых генераторов шума
23	КРР генераторных и модуляторных ламп
24	КРР генераторных коаксиально-волноводных модулей СВЧ на металлокерамических лампах непрерывного режима
25	КРР генераторных и усилительных коаксиально-волноводных модулей СВЧ на металлокерамических лампах импульсного режима
26	КРР стабилитронов газонаполненных
27	КРР газотронов и тиратронов импульсных
28	КРР кенотронов выпрямительных и импульсных
29	КРР искровых разрядников
30	КРР цветных и монохромных кинескопов, индикаторных и осциллографических цветных и монохромных электронно-лучевых трубок
31	КРР индикаторов знакосинтезирующих вакуумных люминесцентных
32	КРР индикаторов знакосинтезирующих жидкокристаллических
33	КРР индикаторов знакосинтезирующих газоразрядных постоянного тока
34	КРР индикаторов знакосинтезирующих газоразрядных переменного тока
35	КРР индикаторов знакосинтезирующих полупроводниковых

Продолжение табл. 1

Номер карты	Описание
36	КРР диссекторов
37	КРР видиконов
38	КРР супервидиконов
39	КРР суперортиконов
40	КРР фотоумножителей
41	КРР электронно-оптических преобразователей
42	КРР фоточувствительных приборов с зарядовой связью
43	КРР фотоэлектронных преобразователей
44	КРР фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов и тепловых приёмников излучения
45	КРР фотоприёмных устройств и тепловых приёмных устройств
46	КРР оптоэлектронных приёмных устройств
47	КРР оптопар
48	КРР оптоэлектронных переключателей логического сигнала
49	КРР газовых лазеров непрерывного и импульсного режима работы
50	КРР твёрдотельных лазеров непрерывного и импульсного режима работы
51	КРР полупроводниковых лазеров непрерывного и импульсного режима работы
52	КРР полупроводниковых излучающих диодов ИК-диапазона
53	КРР полупроводниковых тетродов биполярных (дефензоров)
54	КРР полупроводниковых ограничителей напряжения
55	КРР диодов (выпрямительных, импульсных, универсальных), варикапов и диодных сборок
56	КРР полупроводниковых стабилитронов и стабисторов
57	КРР туннельных и обращённых диодов
58	КРР транзисторов и транзисторных сборок
59	КРР однопереходных транзисторов
60	КРР полевых транзисторов и транзисторных сборок
61	КРР полупроводниковых транзисторных усилителей
62	КРР тиристоров
63	КРР операционных усилителей и компараторов напряжения
64	КРР стабилизаторов напряжения, схем управления импульсными стабилизаторами напряжения
64а	КРР коммутаторов и ключей (форма 89 — в программе)
64б	КРР усилителей (форма 88 — в программе)
64в	КРР балансных смесителей (форма 90 — в программе)
65	КРР цифровых функциональных узлов (модулей, микромодулей, микросхем)

Окончание табл. 1

Номер карты	Описание
66	КРР цифровых функциональных узлов (модулей, микромодулей, микросхем) по временны́м параметрам
67	КРР конденсаторов, конденсаторных сборок, помехоподавляющих фильтров и ионисторов
68	КРР резисторов, резисторных сборок, терморезисторов, поглотителей и потенциометров
69	КРР кварцевых резонаторов, кварцевых микрогенераторов, пьезоэлектрических и электромеханических фильтров и линий задержки на поверхностных акустических волнах
70	КРР двигателей постоянного и переменного тока, электромагнитных муфт и электровентиляторов
71	КРР шаговых электродвигателей электромашинного типа
72	КРР тахогенераторов и двигателей-генераторов
73	КРР сельсинов, вращающихся трансформаторов и фазовращателей
74	КРР цифровых преобразователей угла
75	КРР электрических соединителей
76	КРР автоматических выключателей
77	КРР электромагнитных реле, контакторов, вакуумных выключателей и переключателей, магнитоуправляемых контактов
78	КРР электромагнитных реле максимального тока и электротепловых токовых реле
79	КРР реле времени
80	КРР бесконтактных коммутационных устройств
81	КРР микровыключателей и микропереключателей, тумблеров, кнопок, кнопочных, движковых, поворотных и пакетных переключателей
82	КРР линейных интегральных стабилизаторов напряжения
83	КРР вторичных источников питания
84	КРР силовых трансформаторов
85	КРР импульсных трансформаторов
86	КРР дросселей фильтров
87	КРР предохранителей и держателей предохранителей
91	Прочие элементы
Error	Список ЭРИ, у которых параметры не соответствуют ТУ

Предусмотрена возможность осуществить экспорт данных из АСОНИКА-Р в АСОНИКА-Б. Входной для АСОНИКА-Б файл с напряжениями, токами и мощностями для ЭРИ (рис. 6), полученный из АСОНИКА-Р, содержит:

позиционное обозначение ЭРИ;

```
VD1;T;;Pj:1E-3;;Umax_TU;50;Kel;4;
VT1;T;;Pj;0,000278;f;;Kel;0,001321;Pmax;0.075;
VT2;T;;Pj;0,001063;f;;Kel;0,079014;Pmax;0.075;
VT3;T;;Pj;0,002407;f;;Kel;0,005037;Pmax;0.075;
C2;T;;Kel;2E-6;U;0.9316;Umax_TU;15;
C3;T;;Kel;0,000422;U;3,582;Umax_TU;15;
C4;T;;Kel;0;U;5;Umax_TU;15;
C5;T;;Kel;2,9E-5;U;3,33;Umax_TU;15;
C6;T;;Kel;;U;;Umax_TU;15;
C7;T;;Kel;;U;;Umax_TU;15;
C8;T;;Kel;39064,766667;U;3,358;Umax_TU;15;
C9;T;;Kel;5110,816667;U;0,496;Umax_TU;15;
C10;T;;Kel;11794,983333;U;1,146;Umax_TU;15;
C11;T;;Kel;0,003289;U;1,9853;Umax_TU;15;
C12;T;;Kel;1E-6;U;0,4576;Umax_TU;15;
C13;T;;Kel;0,000277;U;0,2214;Umax_TU;15;
R1;T;;Kel;0,000455;P;5,7E-5;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R2;T;;Kel;0,002316;P;0,000289;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R3;T;;Kel;0,022872;P;0,002859;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R4;T;;Kel;0,000328;P;4,1E-5;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R5;T;;Kel;0,061921;P;0,00774;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R6;T;;Kel;0,0012;P;0,00015;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R7;T;;Kel;0,002728;P;0,000341;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R8;T;;Kel;0,002729;P;0,000341;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R9;T;;Kel;0,000629;P;7,9E-5;Pmax;=TN\9\@5{4!};
R10;T;;Kel;0,102646;P;0,012831;Pmax;=TN\9\@5{4!};
```

Рис. 6. Фрагмент файла с электрическими характеристиками ЭРИ

электрические характеристики и температуры из карт рабочих режимов в зависимости от типа ЭРИ (резистор, конденсатор, диод, транзистор, микросхема и т. д.).

Таблица 2

Перечни электрических параметров ЭРИ

ФОРМА 55		
Диоды (выпрямительные, импульсные, универсальные), варикапы и диодные сборки		
Номер параметра	Наименование параметра	Значение параметра
1	Выпрямительный режим, постоянный или средний выпрямленный ток, мА	
2	Выпрямительный режим, максимальный импульс тока при включении, А	
3	Выпрямительный режим, длительность режима перегрузки, мс	
4	Импульсный режим, максимальный импульсный прямой ток, А	
5	Импульсный режим, длительность импульса, мкс	
6	Максимальное обратное напряжение, В	
7	Частота выпрямленного тока (частота следования импульсов), Гц	
8	Рассеиваемая мощность, мВт	
9	Коэффициент нагрузки	

Окончание табл. 2

ФОРМА 58		
Транзисторы и транзисторные сборки		
Номер параметра	Наименование параметра	Значение параметра
1	Статический режим, напряжение коллектор — эмиттер, В	
2	Статический режим, напряжение коллектор — база, В	
3	Статический режим, напряжение эмиттер — база, В	
4	Статический режим, ток коллектора, А	
5	Статический режим, ток базы, А	
6	Динамический режим, напряжение коллектор — эмиттер, В	
7	Динамический режим, напряжение коллектор — база, В	
8	Динамический режим, напряжение эмиттер — база, В	
9	Динамический режим, ток коллектора, А	
10	Динамический режим, ток базы, А	
11	Длительность импульса, мкс	
12	Частота следования, Гц	
13	Сопротивление в цепи базы, Ом	
14	Режим при включении и выключении, напряжение коллектор — эмиттер, В	
15	Режим при включении и выключении, максимальный ток коллектора, А	
16	Режим при включении и выключении, длительность фронта (спада), мкс	
17	Средняя мощность, Вт	
18	Импульсная мощность, Вт	
19	Коэффициент нагрузки	

При экспорте данных из АСОНИКА-Р в АСОНИКА-Б используется соответствие общих данных в КРР и в моделях надёжности.

Перечень электрических параметров ЭРИ для форм 55 и 58 приведён в табл. 2.

Библиографические ссылки

1. **Шалумов А.С., Шалумов М.А.** Опыт применения автоматизированной системы АСОНИКА в промышленности Российской Федерации. Владимир, Владимирский филиал РАНХиГС, 2017. 422 с.

2. **Шалумов М.А., Шалумов А.С.** Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир, Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.

3. **Автоматизированная** система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учетом внешних воздействий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, С.У. Увайсов, М.А. Шалумов и др.; под ред. А.С. Шалумова. М.: Радиотехника, 2013. 424 с.

4. **Автоматизированная** система АСОНИКА для проектирования высоконадежных радиоэлектронных средств на принципах CALS-технологий / А.С. Шалумов, Ю.Н. Кофанов, Н.В. Малютин и др.; под ред. Ю.Н. Кофанова, Н.В. Малютина, А.С. Шалумова. М.: Энергоатомиздат, 2007. 368 с.

Ссылка для цитирования

Шалумов А.С., Шалумов М.А. АСОНИКА-Р: автоматизированное заполнение карт рабочих режимов электрорадиоизделий // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 243—251.

Требования по оформлению библиографических ссылок

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

УДК 004.89

И.А. Щербатов, канд. техн. наук, доц.
(Московский энергетический институт)

shcherbatovia@mpei.ru

ВЫБОР СПОСОБА ДОСТИЖЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ ЦЕЛИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ РЕМОНТОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Показана важность выбора способа достижения цели в системах управления ремонтом в условиях неопределённости и с учётом технического состояния объектов. Предложен подход, обеспечивающий решение поставленной задачи. Рассмотрен методический пример, подтверждающий эффективность предложенных решений.

Ключевые слова: глобальная цель; способ достижения цели; энергетика; система управления ремонтом; теория нечётких множеств.

The importance of the method choice for the goal achieving in the repair management systems under conditions of uncertainty and taking into account the technical condition of the objects is shown. An approach that provides a solution to the problem is proposed. The methodical example confirming the effectiveness of the proposed solutions is considered.

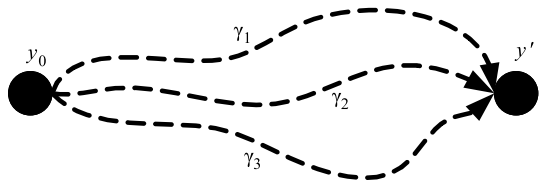
Keywords: global goal; a way to achieve the goal; energetic; repair management system; the theory of fuzzy sets.

Введение. Поддержание оборудования предприятий энергетики в надлежащем техническом состоянии (ТС) является одной из актуальных и наиболее важных задач в контексте обеспечения безаварийного функционирования энергетической системы страны. В настоящее время существует устойчивый тренд на снижение остаточного ресурса энергетического оборудования, что повышает риски возникновения отказов и аварийных ситуаций [1]. При этом организация ремонта по фактическому техническому состоянию [2] является наиболее целесообразной с экономической точки зрения, что обусловлено отсутствием необходимости резервирования дополнительных финансовых средств. Перечень мероприятий по приведению оборудования в надлежащее техническое состояние и их стоимость включаются в ремонтную программу [3]. Глобальная цель в этом случае формулируется на ограниченном множестве естественного языка в терминах необходимости формирования ремонтной программы на определённый временной интервал, а критерием может выступать, например, её совокупная стоимость при ограничениях, накладываемых на имеющиеся финансовые ресурсы [4]. В настоящее время существует множество систем автоматизации управления ремонтом отечественного (например, информационные системы на базе 1С: Предприятие) и зарубежного (система Maximo компании IBM, которая широко представлена на рынке) производства. Эти системы реализуют различные методики оценивания технического состояния и его прогнозирования на некоторый временной интервал [5]. В этой связи крайне актуальной является задача формулирования глобальной цели системы управления ремонтом при различных условиях и способах её достижения.

Условия достижения глобальной цели. Достижение глобальной цели любой сложной технической системы (СТС) — это перевод её в требуемое состояние. Сформулируем условия, выполнение которых обеспечивает перевод системы из начального в целевое состояние. В соответствии с работой [6] состояние системы описывается переменными $y \in A$ и зависит от управляющих воздействий $u \in U$: $y = I(u)$. Тогда на множестве $U \times A$ может быть задан критерий F, позволяющий оценить достижение глобальной цели G.

Условимся, что в дополнение к определению состояния организационной системы введём показатель ρ, который позволяет оценить степень близости достижения глобальной цели (функционирования системы). Введём определение способа достижения цели с учётом понятия состояния системы [6].

Определение 1. Способ достижения цели $\gamma_{g'}$ — формализованная процедура выбора допустимых управляющих воздействий $u_{g'} \in U$, обеспечивающих перевод сложной слабофор-



Геометрическая интерпретация неединственности $\gamma_{g'}$

мализуемой технической системы из состояния $y_0 \in A$ (начальное) в состояние $y' \in A$ (целевое) с требуемой эффективностью $\rho < \varepsilon$.

В общем случае $\gamma_{g'}$ является не единственным. Геометрическая интерпретация неединственности $\gamma_{g'}$ при переводе СТС из $y_0 \in A$ в $y' \in A$ представлена на рисунке.

На основании изложенного сформулируем условия достижения глобальной цели:

(С.1) $\exists \gamma_{g'}: y_0 \xrightarrow{u_{g'} \in U} y'$ — существование способа достижения глобальной цели, обеспечивающего перевод СТС из начального состояния в целевое;

(С.2) $\exists f' \in F: G \xrightarrow{S} F$ — существование критерия, позволяющего измерять достижение глобальной цели;

(С.3) $\exists \rho' \in M: G \xrightarrow{S2} M$ — существование метрики достижения глобальной цели, обеспечивающей определение степени близости целевого состояния СТС;

(С.4) $\exists \varepsilon > 0 : |\rho'| < \varepsilon$ — существование ε-окрестности, попадание в которую свидетельствует о том, что глобальная цель СТС достигнута.

Условия (С.1—С.4) являются необходимыми и достаточными условиями достижения глобальной цели сложной технической системы, функционирующей в условиях различных видов неопределённости внешней среды.

При достижении конкретной глобальной цели $g' \in G$, когда известен способ её достижения $\gamma_{g'}$, на переменные состояния $y \in A$ и управления $u \in U$ наложены ограничения [7]:

$$h(y, u) \leqslant 0; \quad (1)$$

$$\varphi(y, u) = 0. \quad (2)$$

Если существует неопределённость, обусловленная отсутствием возможности измерения переменных состояния или их количественной оценки, а также формализации управляющего воздействия традиционными аналитическими методами, тогда

$$h(y, \hat{y}, u, \hat{u}) \leqslant 0; \quad (3)$$

$$\varphi(y, \hat{y}, u, \hat{u}) = 0, \quad (4)$$

где символ ^ обозначает, что данный параметр является качественным и требует применения методов искусственного интеллекта для формализации.

Для указанного вида неопределённости должен быть задан способ формализации, например, с применением теории нечётких множеств [8—10], а также при необходимости алгоритм получения решения на основе нечётких переменных. Поэтому условимся, что в качестве математического аппарата формализации неопределённости будем использовать именно теорию нечётких множеств и нечёткую логику.

Способ достижения глобальной цели. Множество глобальных целей сложных технических систем по степени формализуемости разделяется на два подмножества: $G1$ — хорошо формализуемые; $G2$ — плохо (слабо) формализуемые. Способ, с помощью которого система управления обеспечивает достижение глобальной цели сложной технической системы, в первую очередь зависит от её принадлежности к подмножествам $G1$ или $G2$, т. е. к формализуемым и слабоформализуемым глобальным целям. Очевидно, что общее число целей СТС объединяет формализуемые и слабоформализуемые, т. е. имеет место следующее выражение $G = G1 \cup G2$ для случая, когда $G1 \cap G2 = \varnothing$, т. е. отсутствуют глобальные цели, которые могут быть описаны как аналитически, так и качественно. Это означает, что если существует возможность аналитической формализации цели СТС, то от качественного описания следует отказаться. Из этого вывода следует упрощение.

Упрощение 1. Случай, когда $G1 \cap G2 \neq \varnothing$ не существует.

Если формализацию глобальной цели $g' \in G$ можно обеспечить с использованием как аналитических, так и качественных методов, то выбор должен быть сделан в пользу аналитических методов. Данный аспект позволит исключить неопределённость, обусловленную наличием экспертных (субъективных) знаний. При этом аналитическая формализация должна обеспечивать гарантированное достижение цели на основе аналитического критерия с применением традиционного математического аппарата. Уточним определение способа достижения цели.

Определение 2. Способ (метод) достижения цели $\gamma_{g'}$ — формализованная процедура решения задачи управления, обеспечивающая существование решения и гарантированное

достижение глобальной цели $g' \in G$ с требуемой точностью $\rho < \varepsilon$ для любых начальных условий (любого начального состояния) и при выполнении необходимых и достаточных условий достижения глобальной цели (С.1—С.4).

Следствием из данного определения является неединственность способа $\gamma_{g'}$ в общем случае для СТС. На основании определения 2 появляется возможность более конкретной формализации понятий «достижимая» и «недостижимая» цель.

Определение 3. Если $\exists\gamma_{g'}{:}g' \in G, f' \in F, \rho < \varepsilon$, то цель $g' \in G$ является достижимой.

Определение 4. Если не выполнено хотя бы одно из условий в определении 2, то цель $g' \in G$ является недостижимой.

Наличие способа (метода) $\gamma_{g'}$ превращает глобальную цель в достижимую. Это означает, что $\gamma_{g'}$ обеспечивает перевод СТС в требуемое состояние. В противном случае (отсутствие $\gamma_{g'}$) глобальная цель не может являться достижимой.

Определение 5. Время $T_{g'}$ достижения цели $g' \in G$ — минимальное время от задания глобальной цели СТС лица, принимающего решение, до её достижения с требуемой точностью $\rho < \varepsilon$.

Следствием из определений 3...5 является принципиальная возможность существования частично достижимой цели СТС. Обозначим $G3 \subset G$ — подмножество достижимых целей, а $G4 \subset G$ — подмножество недостижимых целей.

Определение 6. Частично достижимая цель — глобальная цель СТС, которая за время $0 \leqslant t \leqslant T_{g'}$ из достижимой становится недостижимой в смысле определений 3 и 4, т. е. нарушается одно из условий, которые приведены в определении 2.

Очевидно, имеет место следующее соотношение $G = G3 \cup G4$ (всё множество глобальных целей СТС представляет собой совокупность достижимых и недостижимых целей). Пусть число целей в $|G3| = m_1$, а в $|G4| = m_2$, тогда $|G| = m_1 + m_2 = m$, так как $G3 \cap G4 = \varnothing$ и, следовательно, $|G3 \cup G4| = |G3| + |G4|$, где $\|$ — мощность множества (подмножества), а m — число элементов.

Утверждение 1. В случае появления частично достижимой цели мощность множества глобальных целей $|G|$ не изменяется.

Доказательство. Пусть в процессе функционирования СТС нарушено одно из условий определения 2, тогда в соответствии с определением частично достижимой цели мощности множеств будут равны $|G3| = m_1 - 1$, $|G4| = m_2 + 1$.

Исходя из того, что $G = G3 \cup G4$, и определения мощности множества имеем $|G| = |G3| + |G4|$, тогда получим, что $|G| = m_1 - 1 + m_2 + 1 = m_1 + m_2 = m$. Но при этом новое значение $m_1 = m_1 - 1$, а новое значение $m_2 = m_2 + 1$. Утверждение доказано.

Частичная достижимость глобальной цели СТС, как правило, является следствием изменений, происходящих во внешней среде. Неопределённость внешней среды — наиболее сильный источник возмущений для СТС. Это означает, что для гарантированного достижения глобальной цели СТС система управления должна иметь инструментарий формализованного представления неопределённости внешней среды для снижения её влияния или полного устранения (в наилучшем случае).

Состояние системы и способ достижения цели. Состояние системы описывается чёткими переменными $y(t) \in A$, часть параметров (обозначим их $\hat{y}(t)$) являются нечёткими, но приведённые к чёткости они также принадлежат множеству значений A, т. е. $\mathrm{def}(\hat{y}(t)) \in A$, где def() — оператор приведения к чёткости.

Совокупность переменных $y(t), \mathrm{def}(\hat{y}(t)) \in A$ характеризует состояние, в котором находится СТС в конкретный момент времени t. Таким образом, $y(t)$ — вектор переменных, т. е. $y(t) = [y_{i'}; \mathrm{def}(\hat{y}(t))_{i''}]^{\mathrm{T}}$, $i' + i'' = \overline{1,n}$, где n — число компонент (переменных) вектора $y(t)$. Аналогично вектор-функция управляющих воздействий представляет собой совокупность как чётких, так и нечётких управляющих воздействий — $u(t), \mathrm{def}(\hat{u}(t))$.

Перевод системы из начального состояния $y_0(t)$ в целевое состояние $y'(t + \tau_u)$ осуществляется реализацией вектора управляющих воздействий $u(t) = [u_{i'}(t); \mathrm{def}(\hat{u}(t))_{i''}]^{\mathrm{T}}$. В общем случае вектор $y'(t + \tau_u)$ — значения переменных при достижении глобальной цели СТС $g' \in G$, характеризующейся критерием $f' \in F$.

Определение 7. Такт управления τ_u — время, в течение которого осуществляется реализация управляющего воздействия $u(t)$. Другими словами, можно сказать, что такт управления — время, которое проходит при переводе СТС из состояния y_0 в состояние y'.

Реализация вектор-функции времени $u(t)$ (конкретный способ достижения цели — выбранное для данных условий управляющее воздействие) может быть осуществлена не единственным способом, так как существует несколько $\gamma_{g'}$ для одной глобальной цели $g' \in G$.

Неединственность $\gamma_{g'}$ предполагает наличие дополнительных условий, которые обеспечивают достижение $g' \in G$ и позволяют установить отношение соответствия между способами достижения цели. Данное отношение — выбор конкретного $\gamma_{g'}$ при наличии определённых условий (условия выбора способа (метода) достижения глобальной цели). Тогда существует множество способов (методов) достижения глобальной цели YG и $\gamma_{g'} \in YG$.

Упрощение 2. Для одной глобальной цели $g' \in G$ существует несколько способов её достижения. Выбор того или иного способа достижения глобальной цели может быть представлен бинарным отношением. Бинарное отношение R, определённое на множестве YG : $R \subset YG \times YG$, называется множеством упорядоченных пар $(\gamma_{g'1}, \gamma_{g'2})$, $\gamma_{g'1}, \gamma_{g'2} \in YG$, и тогда $\gamma_{g'1}$ находится в отношении R с $\gamma_{g'2}$, если выполнено условие, что $\gamma_{g'1}, \gamma_{g'2} \in R$, и его записывают $\gamma_{g'1} R \gamma_{g'2}$ [11, 12]. Один способ из множества $\gamma_1 \in YG$ может быть использован для достижения различных целей.

В связи с тем, что присутствует неопределённость, обусловленная субъективностью предпочтений лица, принимающего решение (необходимостью согласования мнений экспертов, если их несколько), в части выбора способа (метода) достижения цели, которая присутствует в СТС, то для формализации условий выбора используем нечёткое отношение [13].

В соответствии с работой [14] нечётким отображением $\widehat{R}1$ на множестве глобальных целей G и возможных способов достижения целей из множества YG называется нечёткое подмножество декартова произведения $G \times YG$, характеризующееся функцией принадлежности $\mu_{\widehat{R}1}(g, \gamma_g): G \times YG \to [0,1]$ (мера уверенности выполнения отношения $g \widehat{R}1 \gamma_g$).

По аналогии нечётким отношением $\widehat{R}2$ на множестве возможных способов достижения цели YG и множестве неопределённостей Ξ (сопровождающих выбор способа в конкретных условиях) называется нечёткое подмножество декартова произведения $YG \times \Xi$, характеризующееся функцией принадлежности $\mu_{\widehat{R}2}(\gamma_g, \xi) : YG \times \Xi \to [0,1]$ (мера уверенности выполнения отношения $\hat{\gamma}_{g'1} \widehat{R}2 \xi$). Условимся, что будем задавать нечёткое отношение с помощью матриц.

На основании изложенного установим, каким образом на выбор конкретной глобальной цели СТС влияет тот или иной тип неопределённости внешней среды, присутствующий в момент времени задания глобальной цели. Используя операцию нечёткой композиции отношений $\widehat{R}1$ и $\widehat{R}2$ [15], можно установить отношение между нечёткими множествами целей G и неопределённостей Ξ:

$$\widehat{R} = \widehat{R}1 \circ \widehat{R}2, \qquad (5)$$

где $\circ$ — операция композиции, например, максиминная —

$$\mu_{\widehat{R}} = \sup_{\xi \in \Xi} \min(\mu_{\widehat{R}1}(g, \gamma_g), \mu_{\widehat{R}2}(\gamma_g, \xi)).$$

Определение соответствия между глобальными целями и неопределённостями внешней среды обеспечит решение задачи достижения глобальной цели СТС.

Методический пример. Пусть заданы множества глобальных целей СТС $G = \{g_1, g_2\}$, способов их достижения цели $YG = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\}$, а также неопределённостей $\Xi = \{\xi_1, \xi_2\}$, где g_1 — разработка годовой ремонтной программы; g_2 — разработка месячного плана работ; γ_1 — планирование при известном техническом состоянии оборудования и тенденциях его изменения; γ_2 — планирование при известном техническом состоянии оборудования и неизвестных тенденциях его изменения; γ_3 — планирование при неизвестном техническом состоянии оборудования и тенденциях его изменения; ξ_1 — техническое состояние оборудования определено; ξ_2 — техническое состояние оборудования определено частично.

Условимся, что для простоты критерии достижения глобальных целей СТС в данном примере не учитываются, тогда пусть

$$\widehat{R}1 = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,2 & 1,0 \\ 0,6 & 0,4 & 0,9 \end{bmatrix}; \ \widehat{R}2 = \begin{bmatrix} 1,0 & 0,1 \\ 1,0 & 0,9 \\ 0,2 & 0,3 \end{bmatrix},$$

где $\widehat{R}1$ — нечёткое отношение «предпочтение выбора γ»; $\widehat{R}2$ — нечёткое отношение «обязательно наличие ξ».

В соответствии с выражением (5) нечёткое отношение «предпочтение g при наличии ξ» можно выразить с использованием следующей композиции матриц отношений:

$$\widehat{R} = \widehat{R}1 \circ \widehat{R}2 = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,3 \\ 0,6 & 0,4 \end{bmatrix}.$$

Пусть в момент времени выбора глобальной цели присутствует неопределённость, за-

данная нечётким множеством $(\xi_1/0,8;\ \xi_2/0,3)$, тогда цель может быть выбрана из соотношения $\Xi = G \circ \widehat{R}, [0,8 \quad 0,3] = [g_1 \quad g_2] \circ \begin{bmatrix} 0,8 & 0,3 \\ 0,6 & 0,4 \end{bmatrix}$. Транспонируем и перепишем её в виде $\begin{bmatrix} 0,8 & 0,3 \\ 0,6 & 0,4 \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,8 \\ 0,3 \end{bmatrix}$. Тогда на основании максиминной композиции (5) получим систему уравнений вида (если $\widehat{R}$ — квадратная матрица, решение будет достаточно простым):

$$\begin{cases} 0,8 = (0,8 \wedge g_1) \vee (0,6 \wedge g_2); \\ 0,3 = (0,3 \wedge g_1) \vee (0,4 \wedge g_2). \end{cases}$$

Из первого уравнения следует, что только одна компонента правой части влияет на результат, т. е. $g_1 \geqslant 0,8$. Подставляя её во второе уравнение, получим $g_2 \leqslant 0,3$. Поэтому принять во внимание можно два решения $[1 \quad 0,3]$ — $\{g_1/1;\ g_2/0,3\}$ (максимальное решение) и решения $[0,8 \quad 0]$ — $\{g_1/0,8;\ g_2/0\}$ (минимальное решение).

Таким образом, если имеется уверенность в том, что техническое состояние оборудования определено, то из двух целей лучше выбрать g_1 — разработка годовой ремонтной программы. В противном случае лучше обеспечить разработку месячного плана работ (g_2) в целях устранения имеющейся неопределённости.

Необходимо отметить, что способы достижения глобальной цели $g' \in G$ являются независимыми (удаление из рассмотрения одного из них не влияет на другие). Отказ от одного из способов достижения конкретной глобальной цели СТС (одна глобальная цель может быть достигнута различными способами) приведёт к уменьшению размерности матрицы отношения.

Заключение. Процесс управления ремонтом компаний энергетической отрасли сопряжён с рядом существенных трудностей. Одной из важнейших является необходимость построения ремонтной программы. Включение той или иной единицы технологического оборудования в состав ремонтной программы определяется её техническим состоянием. При этом составление ремонтной программы или её части (месячного плана) может быть описано как глобальная цель системы управления ремонтом, достижение которой определяется конкретным набором способов в определённых условиях внешней среды. Рассмотренный методический пример подтверждает эффективность предложенного способа выбора глобальной цели системы управления ремонтом для предприятий энергетики.

Библиографические ссылки

1. **Основные** результаты функционирования объектов электроэнергетики в 2015 году / Под ред. зам. министра энергетики Российской Федерации А.В. Черезова. М., 2016. 72 с.
2. **Ящура А.И.** Система технического обслуживания и ремонта общепромышленного оборудования: справочник. М.: ЭНАС, 2012. 360 с.
3. **Проталинский О.М., Проталинская Ю.О.** ERP-система управления деятельностью распределительной сетевой компании // Автоматизация и IT в энергетике. 2016. № 5 (82). С. 10—12.
4. **Проталинский О.М., Проталинский И.О., Кладов О.Н.** Система оптимального управления производственными активами энергетических предприятий // Автоматизация и IT в энергетике. 2017. № 4 (93). С. 5—8.
5. **Крюков О.В., Милов В.Р., Шалашов И.В.** Процедуры прогнозирования и принятия решений в системе технического обслуживания и ремонта // Автоматизация в промышленности. 2010. № 8. С. 47—49.
6. **Бурков В.Н., Новиков Д.А.** Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтег, 1999. 128 с.
7. **Островский Г.М., Волин Ю.М.** Технические системы в условиях неопределённости: анализ гибкости и оптимизация. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 319 с.
8. **Титов В.С., Бобырь М.В.** Модернизация АСУ оборудованием с ЧПУ на основе аппарата нечёткой логики // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 40—43.
9. **Титов В.С., Бобырь М.В., Тевс С.С.** Выбор оптимальных параметров управления технологическим процессом методами нечёткой логики // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 5. С. 21—23.
10. **Титов В.С., Бобырь М.В., Анциферов А.В.** Алгоритм высокоскоростной обработки деталей на основе нечёткой логики // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6. С. 21—26.
11. **Мальцев А.И.** Алгебраические системы. М.: Наука, 1970. 392 с.
12. **Новиков Д.А., Петраков С.Н.** Курс теории активных систем. М.: Синтег, 1999. 104 с.
13. **Леоненков А.В.** Нечёткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ Петербург, 2005. 736 с.
14. **Орловский С.А.** Проблемы принятия решений при нечёткой исходной информации. М.: Наука, 1981. 208 с.
15. **Штовба С.Д.** Проектирование нечётких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия — Телеком, 2007. 288 с.

Ссылка для цитирования

Щербатов И.А. Выбор способа достижения глобальной цели в системах управления ремонтом энергетических предприятий // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 252—256.

УДК 681.4.08:658.562.47

П.А. Акулов, Д.И. Петрешин, д-р техн. наук, доц.
(Брянский государственный технический университет)

akulov.paul@mail.ru, dipetreshin@yandex.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЬНОЙ ОПЕРАЦИИ ПРОВЕРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНИТЕЛЕЙ

Приведено описание автоматизированной установки измерения силы сочленения и расчленения контактов электрических соединителей. Описана структура элементов позиционирования и системы управления. Полученные результаты могут позволить проводить анализ физических процессов, возникающих в контактах разъёмов при их смыкании и размыкании.

Ключевые слова: контактное давление; сила сочленения контакта; сила расчленения контакта; измерительная установка; электрический соединитель.

A description of an automatic installation for measuring the strength of joint and disconnection of electrical connectors is adduced. The structure of the positioning elements and the control system is described. The obtained results may allow conducting an analysis of the physical processes that occur in the contacts of connectors during their closing and opening.

Keywords: contact pressure; contact joint force; contact disconnection force; measuring installation; electrical connector.

Введение. С усложнением технических систем растёт количество, разнообразие типов и форм контактов электрических соединителей (КЭС), их режимов и условий работы. Роль контактов становится всё более ответственной как в техническом, так и в технико-экономическом отношении. Всё это требует дальнейшего глубокого изучения физических процессов, протекающих в КЭС при различных режимах и условиях работы, совершенствования методов инженерного расчёта и конструирования КЭС, правильного нормирования режимов и условий работы КЭС, разработки и исследования новых контактных материалов и новых конструктивных форм КЭС.

Электрические соединители в процессе производства проходят ряд испытаний, в том числе и контроль силы сочленения и расчленения. Автоматизация контрольной операции проверки разъёмов позволяет снизить трудоёмкость выполнения испытаний, максимально исключить влияние человеческого фактора.

Основным требованием, которое предъявляется к контактной паре, является обеспечение надёжности КЭС в заданных режимах в течение установленного срока эксплуатации. Как правило, обеспечение надёжного контакта осуществляется за счёт покрытия их контактирующих частей благородными металлами, обладающими низким электрическим сопротивлением и высокой стойкостью к образованию окисных плёнок, а также созданием достаточно высоких контактных давлений. Однако высокое контактное давление не всегда является положительным фактором, в отдельных случаях оно приводит к повышенному износу контактирующих поверхностей при сочленении-расчленении, а в многоконтактных электрических соединителях затрудняет их сочленение [1].

Контактная пара должна обладать минимальной силой сочленения-расчленения, которая напрямую связана с величиной контактного давления. Однако контактное давление нельзя снижать безгранично. Для каждой конструкции электрического соединителя есть предел минимального контактного давления, ниже которого разъём перестаёт обеспечивать надёжное функционирование [1].

Метод решения. Проверка необходимого контактного давления в упругих контактах является наиболее трудоёмкой операцией технологического процесса сборки электрических соединителей, так как нормативно-техническая документация на электрические соединители обязывает проводить полный контроль этого параметра после сборки разъёма [2].

Физическая сущность процесса контроля контактного давления заключается в определении силы нажатия $P_к$ (рис. 1) пружинящего

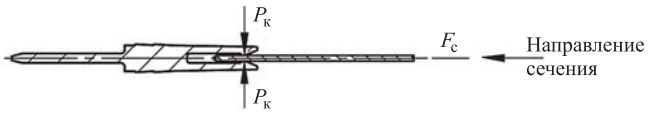


Рис. 1. Контакт в сочленённом состоянии и схема движущих сил

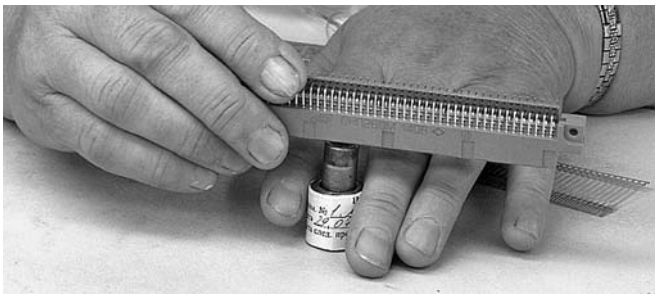


Рис. 2. Ручной процесс контроля силы расчленения контактов

элемента контролируемого контакта на рабочий элемент контрольного прибора.

Реализация контроля силы нажатия контактов $P_к$, учитывая очень малые размеры контактов, а также высокую плотность их расположения в изоляторе и затруднённый к ним доступ, является очень серьёзной задачей. Для упрощения решения этой задачи на практике в основном пользуются косвенным методом контроля контактного давления — методом контроля силы расчленения $F_с$. Суть метода состоит в определении силы расчленения $F_с$ контролируемого контакта со штырём-калибром (рис. 2).

Недостатком этого метода является большая погрешность контроля контактного давления, которая зависит от многих факторов: точности изготовления штыря-калибра, качества его поверхности, скорости относительного перемещения штыря-калибра и контакта, степени износа штыря-калибра и т. д. Несмотря на все недостатки, в настоящее время он является основным методом контроля контактного давления при производстве электрических соединителей на отечественных предприятиях [1].

Автоматизация контроля силы сочленения и расчленения КЭС позволит значительно снизить трудоёмкость этой операции и максимально исключить влияние человеческого фактора на объективность оценки результатов контроля, так как проверка контактного давления «вручную» не может обеспечить стабильную повторяемость требуемых режимов проверки в течение всего периода контроля. Автоматизированная операция контроля силы сочленения и расчленения КЭС может легко встраиваться как в технологический процесс с минимальной автоматизацией, так и в полностью автоматизированный процесс сборки электрических соединителей [1].

Суть автоматизации контрольной операции заключается в использовании автоматизированной измерительной установки [3], позволяющей проводить испытание не только в режиме «годен — не годен», но и фиксировать действительные значения силы сочленения и расчленения КЭС.

Данная работа посвящена созданию автоматизированной измерительной установки контроля силы сочленения и расчленения КЭС.

Автоматизированная измерительная установка контроля силы сочленения и расчленения КЭС. Для автоматизации операции проверки силы сочленения и расчленения КЭС путём ввода ответной части в контакт соединителя разработана измерительная установка, оснащённая тензометрическим датчиком силы с закреплённым на нём штырём-калибром.

Для того чтобы одна установка могла осуществлять измерения различных типов электрических соединителей, она должна быть максимально универсальной. Для этого в конструкции предусмотрены единая посадочная базовая плита и съёмная ответная часть разъёма.

Перемещение штыря-калибра и тестируемого разъёма в рабочей области осуществляется по трём координатам в автоматическом режиме благодаря использованию электроприводов. Общая схема контроля силы сочленения и расчленения КЭС представлена на рис. 3.

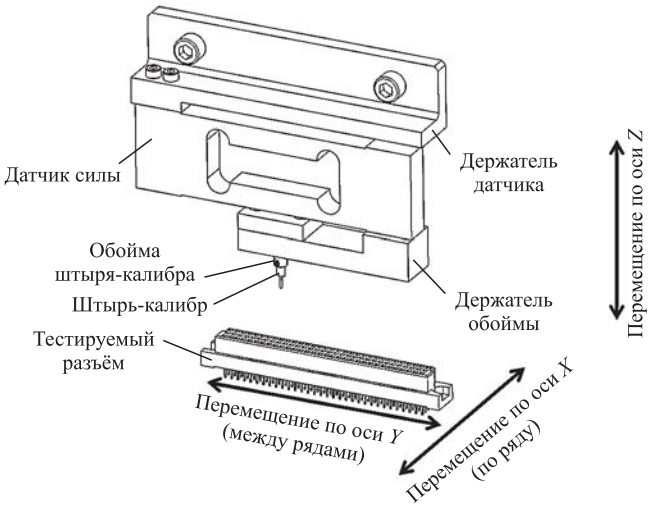


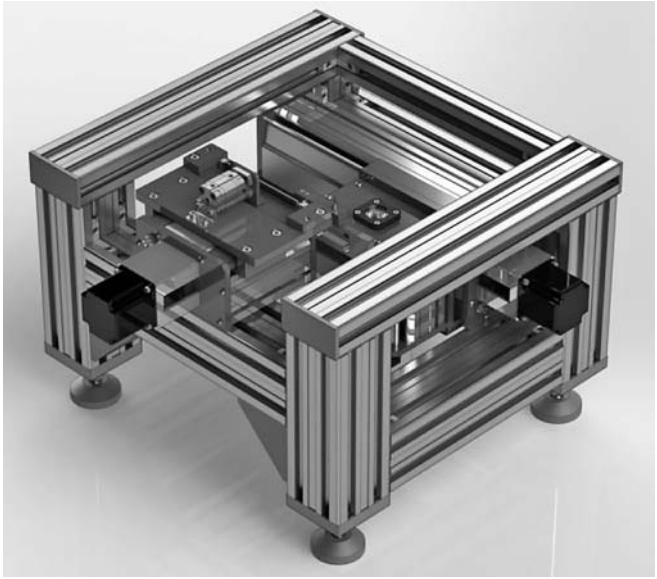
Рис. 3. Схема контроля силы сочленения и расчленения КЭС

Перемещение по оси X обеспечивает переход от одного контакта к другому в ряду, перемещение по оси Y — переход между рядами, а перемещение по оси Z — проведение измерений силы сочленения и расчленения контакта с ответной штырьковой частью разъёма, соединённой с датчиком силы [3]. Кроме того, сигнал с датчика силы является управляющим, т. е. при фиксации перегрузки тензодатчика из-за попадания посторонних предметов, остатков материала изолятора, деформации контакта в результате некачественной сборки процесс проведения измерения немедленно останавливается.

Для позиционирования испытуемого электрического соединителя применяется сменное посадочное место — обойма, соответствующее типу испытуемого разъёма. При смене типа испытуемого электрического разъёма (иной конструкции крепления испытуемого соединителя в обойме) пользователю необходимо сменить обойму (специализированное посадочное место), соответствующую типу испытуемого электрического соединителя. Лёгкая и точная установка данного узла на базовой плите достигается использованием специальных посадочных элементов.

На рис. 4 показаны 3D-модель разработанной автоматизированной установки контроля силы сочленения и расчленения КЭС и внешний вид установки. В данной конструкции измерительный щуп с тензометрическим датчиком силы перемещаются под разъёмом, что позволяет изолировать наиболее чувствительные органы контроля от зоны случайного механического воздействия, которое может повлиять как на результаты испытаний, так и на работоспособность установки в целом. Кроме того, подобное расположение рабочих органов позволяет в случае необходимости интегрировать в общую структуру механизм автоматического извлечения контактов, не прошедших контроль. В настоящее время, такие контакты извлекаются вручную из изолятора с помощью ручных приспособлений (пинцет, захват и т. д.).

В качестве механизмов перемещения по координатным осям применяются разработанные модули линейного перемещения с шарико-винтовой передачей (ШВП) и профильными направляющими (рис. 5). В качестве концевого датчика, используемого при калибровке оси, применяется контактный датчик с точностью срабатывания 2 мкм. Вариативность крепления, изменяемый рабочий ход и замена подвижной плиты с различным



а)

б)

Рис. 4. Автоматизированная измерительная установка контроля силы сочленения и расчленения КЭС:
а — 3D-модель; *б* — внешний вид установки

Рис. 5. Модуль линейного перемещения

расположением посадочных отверстий обеспечивают простую интеграцию в различные системы автоматизации, где требуется точное линейное перемещение. Станина измерительной установки выполнена из прецизионного алюминиевого конструкционного профиля.

Для исключения влияния человеческого фактора при вводе требуемых параметров измерения применяются средства электронной идентификации сменной обоймы и измерительной головки со штырём-калибром. Если считанные идентификационные данные совпадают с типом установленного на измерительной установке тензометрического датчика, то измерительный блок принимает решение о проведении измерений с автоматической установкой требуемых параметров перемещения по всем координатам с соответствующими скоростными параметрами и при допустимом диапазоне измеряемых сил. Данная процедура позволяет проводить измерение силы сочленения и расчленения контактов электрического соединителя для разных разъёмов, исключая ошибку при вводе параметров измерения и выборе алгоритма перемещения щупа. Все необходимые параметры предварительно устанавливаются квалифицированным персоналом, обслуживающим установку, и хранятся в энергонезависимой памяти.

Безусловно, все перечисленные меры не отменяют пошагового контроля регистрируемых сил во избежание поломки измерительной головки бракованными разъёмами или при попадании в зону проведения измерений инородных предметов. Блок управления измерительной установки оставляет возможность изменения параметров измерений только квалифицированным персоналом [3].

Блок-схема электрической части установки представлена на рис. 6.

В состав автоматизированной установки контроля силы сочленения и расчленения КЭС входят следующие блоки:

блок ввода-вывода информации;

измерительный блок;

блок управления приводами осей измерительной установки.

Блок ввода-вывода информации представляет собой сенсорный панельный контроллер СПК 110 [4], который помещён в отдельный пластиковый корпус и закреплён на поворотном кронштейне для удобства пользователя. Подобные устройства относятся к классу устройств с «человеко-машинным интерфейсом» и функциями программируемого логического контроллера. Взаимодействие блока ввода-вывода с измерительным блоком осуществляется по USB-шине, а с блоком управления приводами осей измерительной установки обмен информацией осуществляется по протоколу MODBUS-RTU шины RS-485.

Блок ввода-вывода информации в составе установки выполняет:

выбор режима работы установки;

настойку режима работы;

управление координатами перемещения установки в ручном и автоматическом режимах;

отображение информации;

протоколирование и архивирование данных.

Измерительный блок представляет собой законченное, уникальное электротехническое устройство, обеспечивающее:

приём информации от тензометрического датчика силы (тензодатчика);

обработку и анализ измерительной информации;

сохранение результатов измерения;

формирование управляющих сигналов для привода перемещения оси, на которой закреплён тензодатчик с контрольным штырём-калибром;

обмен информацией с блоком ввода-вывода информации.

Блок управления приводами установки осуществляет управление шаговыми двигателями для реализации линейных перемещений по координатам. В измерительной установке используются три управляемые координаты. Блок управления приводами реализует несколько режимов работы. Это позволяет использовать его для различных

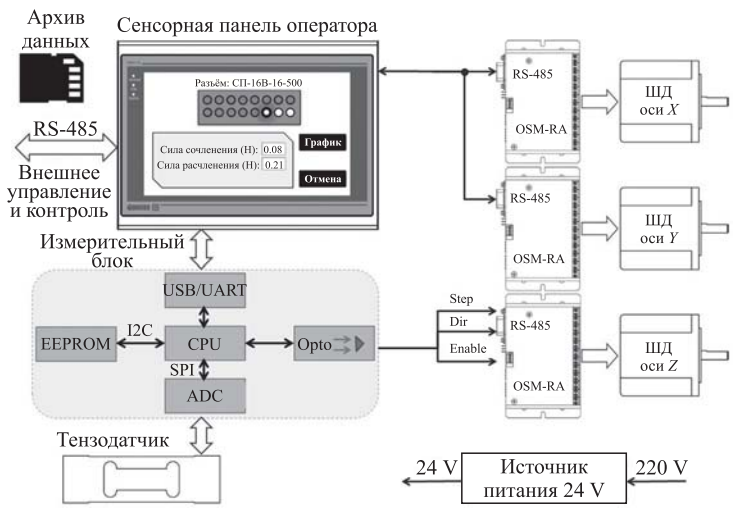


Рис. 6. Блок-схема электрической части измерительной установки

целей, начиная от применения в координатных станках с ЧПУ и заканчивая автономной работой в составе технологических линий. Устройство может управляться стандартными логическими сигналами «Шаг», «Направление» и «Разрешение», работать в автоматическом режиме, вращая двигатель со скоростью, заданной потенциометром, а также управляться в режиме реального времени по последовательному порту [5].

Алгоритм работы с данной установкой включает следующие операции:

установка на базовую плиту соответствующей обоймы для конкретного типа испытуемого разъёма;

фиксация в держателе штыря-калибра;

установка испытуемого разъёма в обойме;

базирование разъёма за счёт автоматического прижима изолятора к стенке обоймы с помощью пневмоцилиндра, установленного на базовой плите;

проведение измерения в автоматическом режиме с регистрацией сил сочленения и расчленения КЭС;

автоматическое отжатие изолятора в обойме;

съём испытанного разъёма.

Результаты, полученные при работе измерительной установки, показали её работоспособность. Измерение силы сочленения и расчленения контактов испытуемого электрического соединителя контрольным штырём-калибром может проводиться с достаточно высокой скоростью в соответствии с работами [6, 7].

На рис. 7 показан процесс измерения силы сочленения и расчленения КЭС с использованием тензометрического датчика с закреплённым на нём ответным штырём-калибром разъёма.

В целях получения детализированных данных о результатах тестирования и измерения установка автоматически генерирует файлы протокола и сохраняет их на флеш-карту. Для этого используется формат представления данных JSON, а в качестве имени файла применяют уникальный идентификатор, сформированный из даты и времени начала проведения тестирования или измерения. В качестве идентификатора режима «тестирование» или «измерение» к уникальному имени файла добавляется суффикс «_m» для режима измерений или «_t» для режима тестирования.

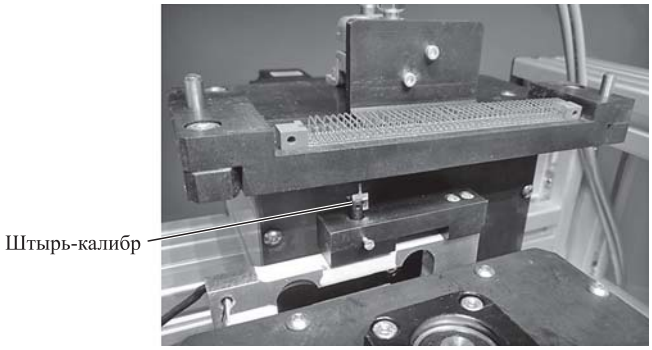


Рис. 7. Процесс измерения силы сочленения и расчленения контакта разъёма СНП260

Дополнительно в заголовке файла выводятся все параметры, при которых осуществлялся процесс тестирования или измерения. После заголовка в файле протоколируется поток данных о величине силы, фиксируемой датчиком усилия для последующей обработки и/или формирования графиков. Полученный файл необходимо открыть через специальное приложение, после чего на экране отобразится график с результатами проведённого измерения.

На рис. 8 представлены результаты измерения сил, фиксируемые датчиком, в процессах вхождения штыря-калибра в измеряемый контакт и выведения штыря из испытуемого контакта. Измерения проведены для нескольких последовательно расположенных контактов в одном ряду разъёма. На рис. 8 по оси абсцисс отложен порядковый номер проверяемого контакта разъёма, а по оси ординат — сила сочленения и расчленения контакта. Время, за которое происходит измерение силы сочленения и расчленения для одного контакта составляет 1,5...2 с, скорость перемещения штыря-калибра в вертикальной плоскости составляет 10 мм/с

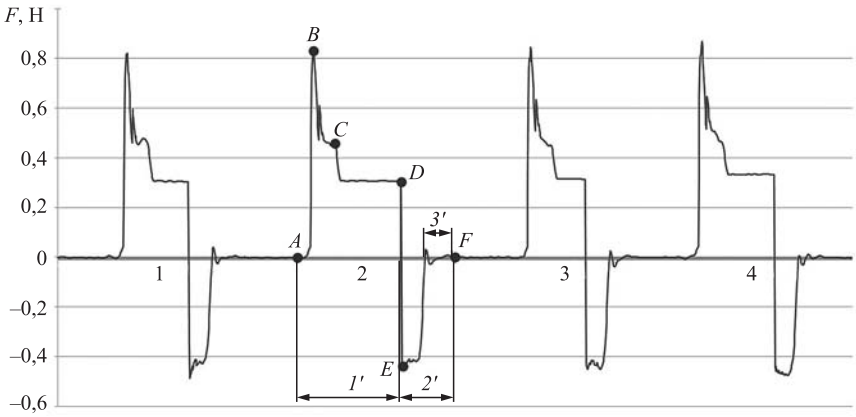


Рис. 8. Результаты измерения силы сочленения и расчленения КЭС

(в соответствии с требованиями [6, 7]). Точность позиционирования и предельное отклонение от прямолинейности осей измерительной установки составляет 0,02 мм, а погрешность определения силы — 0,02 Н.

Анализ полученных результатов измерения силы сочленения и расчленения контакта электрического соединителя показывает, что сочленение штыря-калибра с контактом разъёма происходит на участке *1′* от точки *A* до точки *D*. Точка *B* представляет собой максимальную силу, которую необходимо приложить к штырю-калибру для его сочленения с контактом соединителя. Величина этой силы фиксируется как «сила сочленения».

Сила сочленения представляет собой сумму силы от действия упругих элементов контакта на ответную часть $F_у$ и силы трения $F_{тр}$ штыря-калибра об упругие элементы контакта: $F_с = F_у + F_{тр}$ [3].

Участок от точки *C* до точки *D* определяет силу сочленения, обусловленную величиной силы трения скольжения в сочленяемом контакте.

Глубина проникновения штыря в контакт зависит от типа электрического соединителя и во время испытания контролируется измерительным блоком.

На участке *2′* (от точки *D* до точки *F*) происходит расчленение штыря и контакта. На этом этапе на штырь-калибр также действует сумма силы со стороны упругих элементов контакта и силы трения между штырём-калибром и упругими элементами контакта. Точка *E* обозначает силу расчленения контакта электрического соединителя с контрольным штырём-калибром (фиксируется как «сила расчленения»). На участке *3′* видны колебания, которые определяются упругими свойствами тензодатчика в момент выведения штыря из контакта разъёма.

Заключение. Таким образом, создана автоматизированная измерительная установка контроля сил сочленения и расчленения КЭС, позволяющая значительно увеличить точность и производительность процесса проведения испытаний. Данная установка способна работать в режиме «тестирование» с контролем контактов по принципу «годен — не годен» и в режиме «измерение» с фиксацией реальных значений сил смыкания и размыкания КЭС с контрольным штырём-калибром. Применение собственных механических узлов позиционирования позволяет проводить испытания с минимальными издержками. Погрешность определения силы сочленения и расчленения контакта разъёма составила 0,02 Н. Данные, представленные на рис. 8, являются новыми и представляют интерес для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и изготовлением электрических соединителей. Их анализ позволяет упреждать и корректировать воздействия на производство последующих партий контактов, т. е. появляется возможность статистического регулирования процесса.

Библиографические ссылки

1. **Сафонов А.Л., Сафонов Л.И.,** О некоторых аспектах разработки и производства электрических соединителей. СПб.: Изд-во «Медиа Группа Файнстрит», 2015. 295 с.

2. **РЮМК.430420.020ТУ.** Соединители (вилки, розетки, переходники) типа СНП260, СНП260М. Технические условия. Брянск: ФГУП «Карачевский завод «Электродеталь»», 2006. 47 с.

3. **Акулов П.А., Петрешин Д.И.,** Автоматизированная установка измерения силы сочленения и расчленения единичного контакта электрического соединителя // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. 2017. № 5 (58). С. 66—72.

4. **СПК1xx.** Панель оператора программируемая (панельный контроллер). Руководство по эксплуатации. URL: http://www.owen.ru/uploads/re_spc1xx_1760.pdf (дата обращения: 15.08.2018).

5. **Контроллер шагового двигателя OSM-17RA/OSM-42RA.** Прошивка OSM MB. Полное описание и руководство по эксплуатации. Версия 25-0413. URL: http://onitex.ru/files/Documentation/OSM/datasheet _OSM17RA_OSM42RA.pdf (дата обращения: 15.08.2018).

6. **ГОСТ 23784.** Соединители низкочастотные низковольтные и комбинированные. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1998. 24 с.

7. **ГОСТ Р 51325.2.2—99.** Соединители электрические бытового и аналогичного назначения. Дополнительные требования к вилкам и розеткам для взаимного соединения в приборах и методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 2000. 31 с.

Ссылка для цитирования

Акулов П.А., Петрешин Д.И. Автоматизация контрольной операции проверки электрических соединителей // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 257—262.

УДК 62-52

М.А. Тамаркин, д-р техн. наук, проф., **Э.Э. Тищенко,** канд. техн. наук, доц.,
А.В. Верченко, канд. техн. наук
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
tenh_rostov@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГИДРОАБРАЗИВНОЙ РЕЗКИ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА

Представлены результаты исследований процесса гидроабразивной резки листового проката. Описан процесс обработки, выполнены его теоретические исследования. Получена теоретическая зависимость для определения шероховатости поверхности реза. Приведены результаты экспериментальных исследований процесса, подтверждающие адекватность полученной теоретической зависимости. Даны рекомендации по оптимизации процесса в условиях производства.

Ключевые слова: гидроабразивная резка; шероховатость поверхности; оптимизация процесса.

The research results of the sheet metal abrasive water jet cutting process are introduced. The machining process is described; its theoretical studies are performed. A theoretical relationship for determining the roughness of the cut surface is obtained. The experimental studies results of the process, confirming the adequacy of the obtained theoretical dependence, are adduced. Recommendations over the process optimization under production conditions are given.

Keywords: abrasive water jet cutting; surface roughness; process optimization.

В современной авиационной и ракетно-космической промышленности идёт активное освоение новых методов получения заготовок, отличающихся от традиционных высокой производительностью и широкими технологическими возможностями. В условиях единичного производства, к которому в настоящее время относится изготовление летательных аппаратов, получение штампованных и литых заготовок не является рентабельным ввиду дороговизны изготовления технологической оснастки и необходимости приобретения оборудования с высокой стоимостью. Поэтому всё чаще используют заготовки, получаемые путём вырезки из толстого листового проката.

Среди современных и наиболее перспективных методов раскроя заготовок можно выделить метод гидроабразивной резки. Широкие диапазоны толщины обрабатываемых заготовок, возможность резки практически любых по химическому составу материалов (цветных металлов и сплавов, углеродистых и легированных сталей, жаропрочных сталей, титановых сплавов, композиционных материалов, дерева, пластика, стекла, камня и т. д.), высокая производительность, получение высокого качества поверхности реза, возможность обработки заготовок сложной геометрии делают этот метод обработки наиболее востребованным в условиях современного заготовительного производства. Немаловажными преимуществами метода также можно считать отсутствие термического воздействия на материал, низкую силу резания, эрозионный характер разрушения, который не способствует развитию внутренних напряжений в зоне реза.

При гидроабразивной резке разрезание материала производится тонкой струёй смеси воды и абразива, которые подаются с высокой (сверхзвуковой скоростью) и под высоким давлением. Процесс представляет собой эрозионное разрушение под действием рабочей струи, при котором мелкие частички абразива снимают микростружки с поверхности обрабатываемой заготовки, а вода эвакуирует их из зоны резания. В качестве абразива используют остроконечные измельчённые минералы с величиной зерна от 0,1 до 0,3 мм. В зависимости от обрабатываемого материала и его толщины количество используемого абразива составляет от 100 до 600 г/мин. При производстве заготовок для деталей летательных аппаратов чаще всего применяют гранатовый песок — природный абразивный минерал, обладающий высокой прочностью, твёрдостью 7,5—8,0 по шкале Мооса и идеальной формой зерна. Чтобы гарантировать качество резки, абразив не должен содержать крупных зёрен и пыли. Обычно используются зёрна размерами от 80 до 120 мкм.

Несмотря на очевидные преимущества и достоинства рассматриваемого метода получе-

ния заготовок процесс гидроабразивной резки изучен недостаточно. Анализ работ таких учёных, как Р.А. Тихомиров, Е.Н. Петухов, В.Ф. Бабанин, Ю.С. Степанов, М.А. Бурнашев, В.Д. Шапиро, Г.В. Барсуков, D. Arola, M. Ramulu, Y. Zhang, J. Chao, J. Zeng, В.В. Шпилёв, показал что существуют зависимости для определения размерных характеристик изделия, получаемого методом гидроабразивной резки. Описано влияние режимов резания на точность получения криволинейного профиля заготовки. Предложены возможности увеличения режущей способности, например, путём закручивания струи или дискретной подачей абразива. Однако формулы для определения качества поверхности реза в зависимости от основных технологических параметров обработки (давления струи, зернистости, размера и расхода абразива, подачи сопла, физико-механических параметров материала и т. п.) отсутствуют. Отсутствие адекватных теоретических моделей формирования профиля шероховатости поверхности реза не позволяет технологу выполнять оптимизацию процесса с учётом требований к заданной шероховатости.

При проведении теоретических исследований процесса гидроабразивной резки выявлены закономерности взаимодействия абразивных частиц с поверхностью обрабатываемой заготовки. Исследовано влияние технологических параметров обработки на шероховатость поверхности реза, а также описан механизм формирования зон реза. По сечению реза при осуществлении процесса наблюдается неравномерность распределения шероховатости и образование так называемых зон гладкого и волнистого реза. Одна зона плавно перетекает в другую. Зона гладкого реза представляет собой равномерную гладкую поверхность с установившейся шероховатостью, а зона волнистого реза — волнистую структуру с выемками, которые представляют собой риски, направленные в сторону, обратную направлению подачи режущей струи. Пропорциональность этих зон зависит от режимов обработки.

Основываясь на зависимостях для определения съёма металла при единичном взаимодействии абразивного зерна при обработке детали свободным абразивом, предложенных в работах [1, 2], а также на результатах исследований других авторов [3], получена зависимость для определения максимальной глубины внедрения абразивной режущей частицы:

$$h_{\max} = DK_L \sin\alpha \sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}\rho_{\text{ч}}}{3c\rho_{\text{см}}k_s\sigma_s}}, \qquad (1)$$

где D — диаметр частицы, м; K_L — коэффициент потерь, учитывающий расстояние от сопла до поверхности обрабатываемой детали; α — угол встречи частицы абразива с поверхностью реза, град; $P_{\text{дин}}$ — динамическое давление смеси, Па; $\rho_{\text{ч}}$ — плотность материала частиц, кг/м^3; c — коэффициент, оценивающий несущую способность контактной поверхности; $\rho_{\text{см}}$ — плотность рабочей смеси жидкости и частиц, кг/м^3; k_s — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; σ_s — предел текучести материала детали, МПа.

На основании работ [1—4] получена формула для определения шероховатости поверхности при гидроабразивной резке:

$$Ra = 10{,}18k_\alpha^{Ra}\sqrt{\frac{h_{\max}R}{\sqrt{\lambda}}}, \qquad (2)$$

где k_α^{Ra} — коэффициент, учитывающий угол падения струи; $h_{\max}$ — максимальная глубина внедрения режущей частицы; R — радиус абразивных частиц, м; λ — интенсивность потока событий (число взаимодействий частиц абразивной среды с поверхностью детали в единицу времени на площади квадрата упаковки).

Подставив выражение для определения $h_{\max}$ в формулу (2), получим зависимость для расчёта шероховатости, которая учитывает число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки λ [4, 5]:

$$Ra = 10{,}18K_\alpha^{Ra}\sqrt{2R^2K_L\sin\alpha\sqrt{\frac{2P_{\text{дин}}\rho_{\text{ч}}}{3\lambda c\rho_{\text{см}}K_S\sigma_S}}}. \qquad (3)$$

Величина λ — это функция от подачи, количества абразива в режущей струе и глубины реза, на которой рассматривается воздействие частиц среды. Чем меньше подача сопла режущей головки, тем большее количество частиц абразива участвует в формировании шероховатости поверхности реза. При увеличении количества абразива в режущей струе растёт и количество полезных соударений с поверхностью заготовки, а значит, улучшается шероховатость поверхности. От глубины измерения шероховатости зависит, какое количество зёрен и с какой энергией будет взаимодействовать с обрабатываемым материалом. Чем больше глубина измерения, тем меньшей энергией обладают частицы и более грубой получается шероховатость поверхности. Величина λ определена экспериментальным путём [4, 5].

Для подтверждения адекватности полученной теоретической зависимости проведён комплекс экспериментальных исследований процесса гидроабразивной резки.

В качестве оборудования использована 5-координатная установка для гидроабразивной резки Flow с числовым программным управлением. Для изготовления образцов использовали материалы, часто применяемые при изготовлении деталей летательных аппаратов (сталь 30ХГСА, алюминиевый сплав Д16Т, полимеркомпозиционный материал типа «стеклопластик—титан» и др.).

Измерение шероховатости проводили на цифровом профилометре Surtronic 25 фирмы Taylor Hobson. Статистическая обработка результатов исследований выполнялась с использованием программы прикладных и научных расчётов MathCad.

Проводились исследования влияния на шероховатость поверхности образца таких параметров, как подача сопла, расход абразива, физико-механические свойства материала, толщина обрабатываемого материала.

Данные экспериментов показывают, что при увеличении подачи сопла ухудшается шероховатость поверхности реза, растёт отношение высоты зоны волнистого реза к зоне гладкого реза. Эксперимент проводился при ступенчатом увеличении подачи через каждые 15 мм реза от 5 мм/мин до величины, при которой прекращалось сквозное разрезание материала.

На основании полученных данных выполнены статистическая обработка и регрессионный анализ, в результате которого получены одно- и двухфакторные уравнения регрессии, показывающие, как изменяется шероховатость поверхности реза с увеличением подачи сопла S, а также при изменении глубины измерения шероховатости (рис. 1). На этом и последующих рисунках точками обозначены экспериментальные значения, а линиями и поверхностями — регрессионные зависимости.

Однофакторное уравнение регрессии для нахождения шероховатости реза на глубине измерения 10 мм в зависимости от подачи S выглядит следующим образом:

$$Ra_{10} = 2,261 \cdot 10^{-6} + 7,15 \cdot 10^{-9} S + \\ + 5,633 \cdot 10^{-11} S^2. \quad (4)$$

Двухфакторное уравнение регрессии для нахождения шероховатости поверхности реза в зависимости от подачи S и глубины измерения шероховатости h для стали 30ХГСА в состоянии поставки (сырой) можно записать следующим образом:

$$Ra = 3,602 \cdot 10^{-6} - 3,225 \cdot 10^{-8} S - \\ - 1,35 \cdot 10^{-7} h - 1,963 \cdot 10^{-9} Sh + \\ + 2,439 \cdot 10^{-11} S^2 h + 9,569 \cdot 10^{-11} Sh^2 + \\ + 8,116 \cdot 10^{-10} S^2 + 6,191 \cdot 10^{-11} h^2 - \\ - 5,056 \cdot 10^{-12} S^3 - 1,202 \cdot 10^{-10} h^3. \quad (5)$$

Экспериментальные исследования также проводились на закалённой стали 30ХГСА (рис. 2) и алюминиевом сплаве Д16Т (рис. 3) Установлено, что на более твёрдых заготовках шероховатость поверхности стремительно возрастает при увеличении подачи, а высота зоны волнистого реза преобладает над зоной гладкого реза. На закалённой стали сквозное разрезание материала прекратилось на более низких значениях подачи в сравнении с «сырой». Такое явление можно описать падением энергетических параметров струи и эффектом «отражения». Соударяясь с более твёрдым материалом, зёрна материала интенсивнее разрушаются и большее количество зёрен отскакивает в обратном направлении, не вызывая

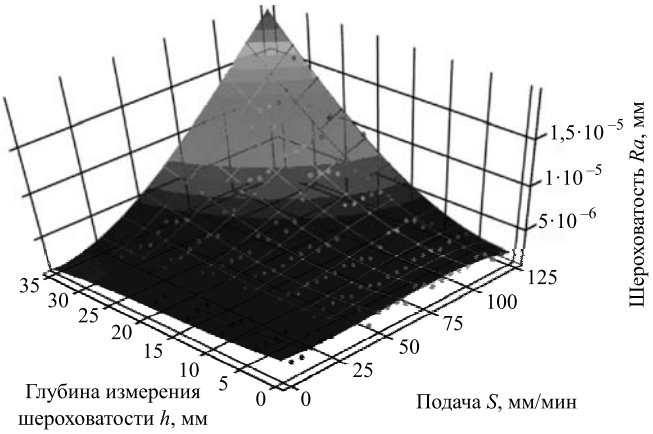


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности на образце из стали 30ХГСА толщиной 30 мм от подачи сопла и глубины измерения шероховатости

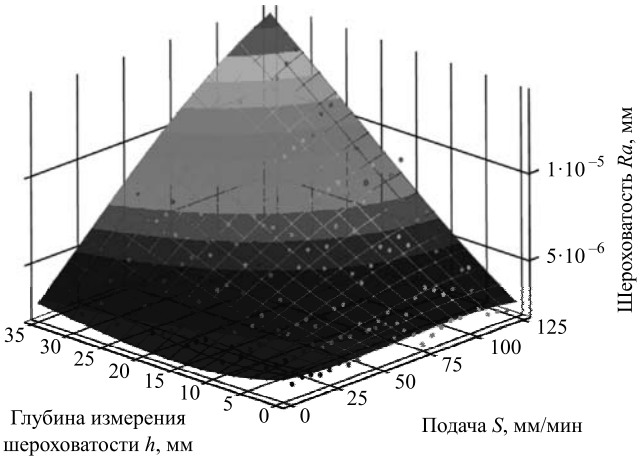


Рис. 2. Зависимость шероховатости поверхности на образце из закалённой стали 30ХГСА толщиной 30 мм от подачи сопла и глубины измерения шероховатости

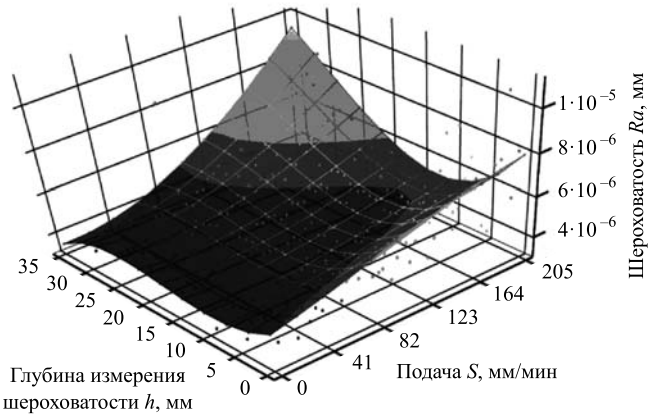


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности на образце из алюминиевого сплава Д16Т толщиной 30 мм от подачи сопла и глубины измерения шероховатости

полезного взаимодействия, тем самым мешая следующим зёрнам попасть в зону резания.

Двухфакторное уравнение регрессии для нахождения величины шероховатости поверхности реза в зависимости от подачи S и глубины измерения шероховатости h для закалённой стали 30ХГСА выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} Ra = {} & 3{,}091\cdot10^{-6} - 1{,}819\cdot10^{-8}S - \\ & - 1{,}429\cdot10^{-7}h + 4{,}101\cdot10^{-9}Sh - \\ & - 6{,}565\cdot10^{-12}S^2h - 1{,}456\cdot10^{-11}Sh^2 + \\ & + 3{,}491\cdot10^{-10}S^2 + 6{,}054\cdot10^{-9}h^2 - \\ & - 1{,}852\cdot10^{-12}S^3 - 6{,}222\cdot10^{-11}h^3. \end{aligned} \quad (6)$$

Запишем двухфакторное уравнение регрессии для нахождения величины шероховатости поверхности реза в зависимости от подачи S и глубины измерения шероховатости h для алюминиевого сплава Д16Т:

$$\begin{aligned} Ra = {} & 4{,}882\cdot10^{-6} - 1{,}412\cdot10^{-8}S - \\ & - 1{,}983\cdot10^{-7}h - 2{,}233\cdot10^{-9}Sh + \\ & + 4{,}112\cdot10^{-12}S^2h + 5{,}087\cdot10^{-11}Sh^2 + \\ & + 4{,}118\cdot10^{-11}S^2 + 1{,}455\cdot10^{-8}h^2 - \\ & - 1{,}821\cdot10^{-13}S^3 - 2{,}856\cdot10^{-10}h^3. \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты эксперимента показали, что у вершины реза шероховатость поверхности хуже, на ней имеются более глубокие царапины. С увеличением глубины шероховатость поверхности улучшается, поток частиц стабилизируется, а рассеяние частиц уменьшается. При увеличении подачи падает количество взаимодействий частиц с материалом, поэтому шероховатость поверхности ухудшается, на поверхности реза остаются глубокие царапины. Алюминиевый сплав является более мягким материалом, поэтому на малых значениях подачи наблюдается образование более глубоких царапин в сравнении с обработкой более твёрдых материалов. Это следствие того, что единичным частицам, которые отклоняются от траектории движения вдоль реза, легче вступить во взаимодействие с материалом. Но при этом процесс резания проходит интенсивнее, металл сильнее поддаётся абразивному износу, а значит, менее стремительно растут зоны волнистого реза.

В ходе исследований предложен механизм образования зоны волнистого реза. При увеличении подачи происходит увеличение угла внедрения частиц в материал детали за счёт большего отставания режущей струи. При малых углах внедрения происходят съём металла и образование равномерной поверхности. С увеличением угла количество отражённых частиц растёт, а количество полезных взаимодействий с материалом уменьшается. Отражённые частицы препятствуют процессу резания и являются преградой для вновь поступающих в зону резания частиц. При этом происходит непрерывное движение струи в направлении подачи. Угол внедрения растёт, и при достижении определённого отклонения струи процесс сквозного пробития материала происходит вновь. При этом частицы, соударяясь друг с другом, отскакивают в сторону и продвигаются в направлении обработанной поверхности, тем самым образуя глубокие борозды. При движении режущей струи по направлению подачи отклонение струи, увеличение угла атаки и пробитие материала повторяются. Таким образом, образуется зона волнистого реза, рельеф которой похож на волны, состоящие из впадин и гребней.

Полученные регрессионные модели позволяют определить шероховатость поверхности

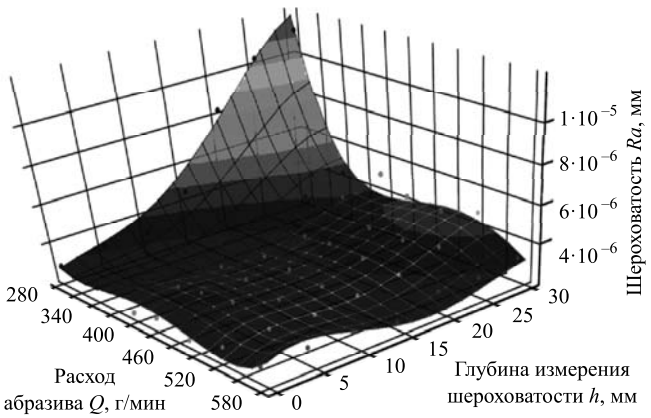


Рис. 4. Зависимость шероховатости поверхности на образце из стали 30ХГСА толщиной 30 мм от величины расхода абразива и глубины измерения шероховатости

реза в любой точке по глубине реза, а также ширину зон гладкого и волнистого реза.

В следующей серии экспериментов проводились исследования влияния расхода абразива и толщины обрабатываемого материала на шероховатость поверхности реза (рис. 4).

Двухфакторное уравнение регрессии для нахождения величины шероховатости поверхности реза в зависимости от расхода абразива Q и глубины измерения шероховатости h имеет вид

$$\begin{aligned} Ra = {} & 1,213\cdot10^{-4} - 1,222\cdot10^{-6}Q + \\ & + 4,961\cdot10^{-6}h - 3,65\cdot10^{-8}Qh + \\ & + 8,78\cdot10^{-11}Q^2h - 2,136\cdot10^{-10}Qh^2 + \\ & + 4,62\cdot10^{-19}Q^2 + 3,627\cdot10^{-8}h^2 - \\ & - 7,589\cdot10^{-12}S^3 + 9,706\cdot10^{-10}h^3 + \\ & + 1,233\cdot10^{-13}Q^2h^2 - 6,703\cdot10^{-14}Q^3h + \\ & + 2,089\cdot10^{-12}Qh^3 + 4,572\cdot10^{-15}Q^4 + \\ & + 2,089\cdot10^{-12}h^4. \end{aligned} \tag{8}$$

Далее проведены исследования влияния подачи на шероховатость поверхности реза при обработке полимеркомпозитных материалов (рис. 5).

Получено двухфакторное уравнение регрессии для нахождения шероховатости поверхности реза в зависимости от подачи S и глубины измерения шероховатости h для полимеркомпозитного материала типа «стеклопластик—титан»:

$$\begin{aligned} Ra = {} & 2,706\cdot10^{-13}Sh - 3,157\cdot10^{-10}h + \\ & + 1,886\cdot10^{-8}h^2 - 3,062\cdot10^{-7}h - \\ & - 1,301\cdot10^{-10}Sh + 1,469\cdot10^{-12}S^2h + \\ & + 4,288\cdot10^{-6} + 1,324\cdot10^{-8}S - \\ & - 5,142\cdot10^{-11}S^2 + 7,308\cdot10^{-14}S^3. \end{aligned} \tag{9}$$

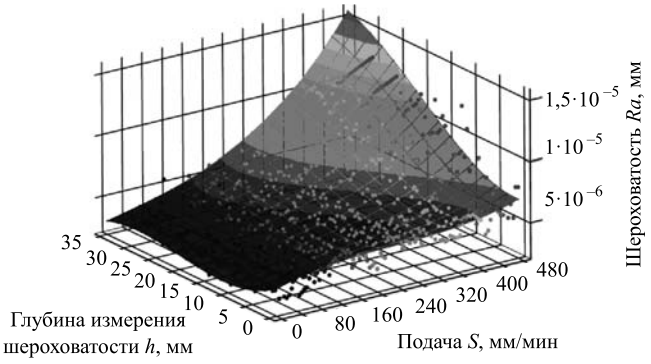


Рис. 5. Двухфакторная модель формирования шероховатости поверхности реза от подачи сопла и глубины измерения шероховатости для полимеркомпозитного материала типа «стеклопластик—титан»

Число полезных взаимодействий абразивных частиц в единицу времени λ определялось путём сравнения значений, полученных расчётом по регрессионным моделям, выведенным по экспериментальным данным, и теоретической зависимости для определения шероховатости поверхности (3). Теоретическое значение шероховатости поверхности рассчитывалось при $\lambda = 1$.

На рис. 6—8 приведены зависимости шероховатости поверхности реза, определённой по теоретическим расчётам по формуле (3), от величины подачи абразива для стали 30ХГСА до термообработки. Здесь теоретическая кри-

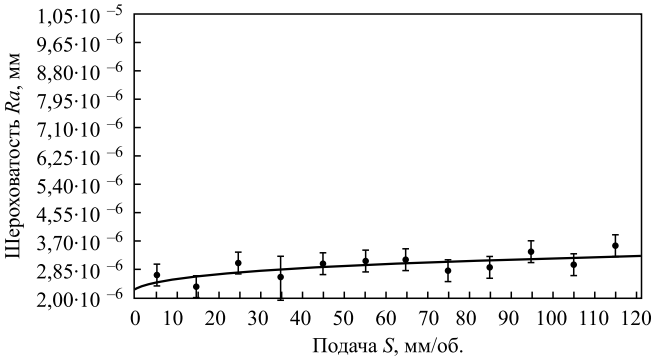


Рис. 6. Зависимость шероховатости поверхности реза от подачи на глубине 10 мм

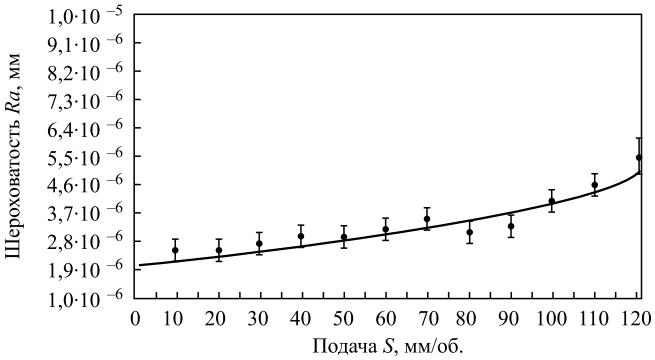


Рис. 7. Зависимость шероховатости поверхности реза от подачи на глубине 15 мм

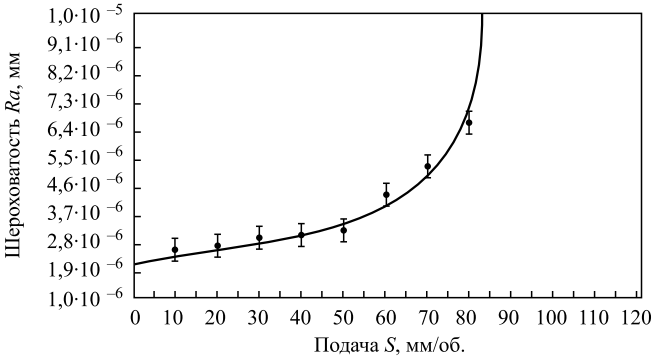


Рис. 8. Зависимость шероховатости поверхности реза от подачи на глубине 25 мм

Сравнение режимов гидроабразивной резки детали «Скоба» до и после оптимизации процесса

Исходные данные		Результаты расчёта
Обработка до оптимизации согласно заводской технологии	Материал — сталь 30ХГСА; σ_s = 490 МПА; исходная шероховатость Ra = 6,3 мкм; диаметр частиц D = 0,08 мм; давление струи P = 405,3 МПа; расход абразива Q = 395 г/мин; длина реза L = 1717 мм; глубина измерения h = 30 мм	Шероховатость Ra = 2,6 мкм; подача S = 25 мм/мин; время реза $T_{реза}$ = 0,907 ч; стоимость реза $C_{реза}$ = 2126 руб.
Обработка по режимам, предложенным после оптимизации технологического процесса	Материал — сталь 30ХГСА; σ_s = 490 МПА; исходная шероховатость Ra = 6,3 мкм; диаметр частиц D = 0,08 мм; давление струи P = 405,3 МПа; расход абразива Q = 395 г/мин; длина реза L = 1717 мм; глубина измерения h = 30 мм	Шероховатость Ra = 6,126 мкм; подача S = 63 мм/мин; время реза $T_{реза}$ = 0,36 ч; стоимость реза $C_{реза}$ = 843,51 руб.

вая показана сплошной линией, а результаты экспериментальных исследований изображены точками с доверительными интервалами (доверительная вероятность 95 %).

Аналогичным образом построены графики для других исследуемых материалов.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных показывает, что значения, рассчитанные по формуле (3), довольно точно и адекватно описывают протекание процесса. Расхождение результатов не превосходит 15 %.

Переход от прямой линии графика к подъёму показывает место смены зоны гладкого реза зоной волнистого, для которого характерно резкое ухудшение шероховатости поверхности. С ростом подачи сопла возрастает величина зоны волнистого реза (подъём становится более резким).

На основании данных проведённых исследований появляется возможность выполнить оптимизацию процесса гидроабразивной резки по критерию наименьшей себестоимости обработки. Оптимальными режимами резания будут те, при которых обеспечивается заданная шероховатость при наименьшей себестоимости реза.

Массив исходных данных будет формироваться в виде постоянных значений параметров обработки (исходная шероховатость, давление струи, длина реза, глубина измерения, размер абразивной частицы и др.) и переменных диапазонов подачи и расхода абразива.

Произведём расчёт числа полезных соударений λ. Затем подставим эти значения в зависимость для определения шероховатости (3). Далее сравним полученные и заданные значения шероховатости обработанной поверхности. Отсеиваем значения, при которых требования по заданной шероховатости не обеспечиваются. Осуществляем расчёт себестоимости реза и выбираем значения параметров обработки, при которых себестоимость реза будет минимальна.

Для наглядности приведён пример оптимизации технологического процесса гидроабразивной резки заготовки для детали «Скоба», применяемой в авиастроении (таблица).

После проведения оптимизации параметров гидроабразивной резки можно сделать вывод, что получено значительное снижение трудоёмкости и себестоимости изготавливаемой детали (примерно в 2,5 раза).

Применение методики оптимизации технологических процессов гидроабразивной резки прошло промышленные испытания в условиях механического завода РВПК ПАО «Роствертол».

Библиографические ссылки

1. **Тамаркин М.А.** Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. ... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону, 1995. 198 с.

2. **Tamarkin M.A.** The optimization of technological processes of details processing by free abrasives // Key Engineering Materials. 2005. P. 319—322.

3. **Королёв А.В., Новосёлов Ю.К.** Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. Т. 1, 2.

4. **Верченко А.В.** Повышение эффективности технологических процессов гидроабразивной резки деталей: дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2017. 128 с.

5. **Тамаркин М.А., Верченко А.В.** Исследование шероховатости поверхности реза при гидроабразивной резке // Вестник ДГТУ. 2017. № 2 (89). С. 116—130.

Ссылка для цитирования

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Верченко А.В. Оптимизация процесса гидроабразивной резки листового проката // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 263—269.

УДК 62-52

И.Н. Куликов, Л.Л. Колесник, канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

kulik19998@gmail.com, l.kolesnik@m-i.ru

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО МНОГОКЛАСТЕРНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ ПОЛУФАБРИКАТОВ

Исследованы многокластерный технологический комплекс, зависимость его производительности от вариантов компоновки и график запуска полуфабрикатов с помощью имитационного моделирования. Показано, что с помощью данного подхода можно существенно повысить производительность эксплуатируемых установок.

Ключевые слова: полупроводниковое производство; многокластерный технологический комплекс; структурные схемы полуфабрикатов; график запуска полуфабрикатов.

The multi-cluster technological complex, the dependence of its performance from the layout variations and the schedule for the launch of semi-finished products by using simulation modeling are studied. It is shown that with help of this approach it is possible to significantly improve the performance of operated installations.

Keywords: semiconductor manufacturing; multi-cluster technological complex; structural schemes of semi-finished products; run schedule of semi-finished products.

Введение. При проектировании многокластерных технологических комплексов (МТК) для соблюдения вакуумной гигиены при производстве наноэлектронных устройств неизбежно возникают вопросы повышения производительности таких систем при многономенклатурном производстве. Для увеличения производительности установки и при наличии соответствующих модулей целесообразно в систему одновременно запускать пластины с разными маршрутами. В таких случаях необходимо находить оптимальные варианты структурных компоновок и соответствующих им графиков запуска полуфабрикатов, что является нетривиальной задачей.

Проблемой современной полупроводниковой промышленности является постоянная смена номенклатуры выпускаемых изделий в соответствии с пожеланиями заказчика [1]. При серийном производстве изделий данная проблема стоит очень остро, так как каждое изменение производственного кластера неизбежно влечёт за собой снижение общей производительности.

Решение проблемы. Одним из решений данной проблемы стала разработка кластерного оборудования, которое позволяет (благодаря своей модульности) снизить временные затраты на переналадку. Это осуществляется путём формирования кластерной расширяемой системы, состоящей из различных модулей, каждый из которых позволяет выполнять целый набор операций.

Ввиду большого количества возможных вариантов компоновки [2] и графика запуска полуфабрикатов, а также многономенклатурности производства, появляется проблема поиска и расчёта вариантов, позволяющих максимально утилизировать возможности установки.

Для решения указанных проблем нахождения наиболее оптимального варианта графика запуска полуфабрикатов, а также наиболее

Операции при производстве процессора

Операция № 1	Операция № 2
Установка № 4 (присутствуют все камеры)	Установка № 2 (нет камер *F* и *D*)
Рецепт *F*(30)->*C/D*(85)->*A*->*1/2*(67)->*B*(55)	Рецепт *C*(40)->*A*->*1*(25)->*2/3*(221)->*B*(51)
Время на 25 пластин — 60 мин	Время на 25 пластин — 70 мин

оптимального варианта компоновки комплекса предлагается использовать имитационное моделирование [3—7].

В данной работе исследован технологический процесс производства процессора, который состоит из 268 операций, часть из которых реализуется в цехе термического напыления на установках Applied Materials ENDURA (рис. 1).

В рамках данного цеха реализуются (кроме прочих) две последовательные операции, параметры которых показаны в таблице. Общий вид установки приведён на рис. 2.

Как видно из таблицы, в рецептах есть пересекающиеся операции, но различающиеся по своей длительности (в скобках указана длительность операции в секундах). При последовательной обработке на двух разных установках очевидно, что производительность составляет 0,00641 пластин в секунду.

В данном случае (рис. 3) видно, что модули *E* и *4* не участвуют в операциях, поэтому в моделируемой установке с совмещёнными рецептами предлагается заменить неучаствующие модули на модули, в которых время обработки максимально. Принципиальная схема установки и схема потоков полуфабрикатов показаны на рис. 4. Количество лап у роботов (по одной в каждом) и их скорость (0,2π рад / с) остаются неизменными.

По результатам имитационного моделирования был определён график запуска (рис. 5), соответствующий максимальной производительности, которая (с учётом времён откачки и выгрузки на атмосферу) составляет 0,07576 пластин в секунду, и минимальной — 0,006256 пластин в секунду соответственно.

Предложенный вариант установки увеличивает производительность по сравнению с су-

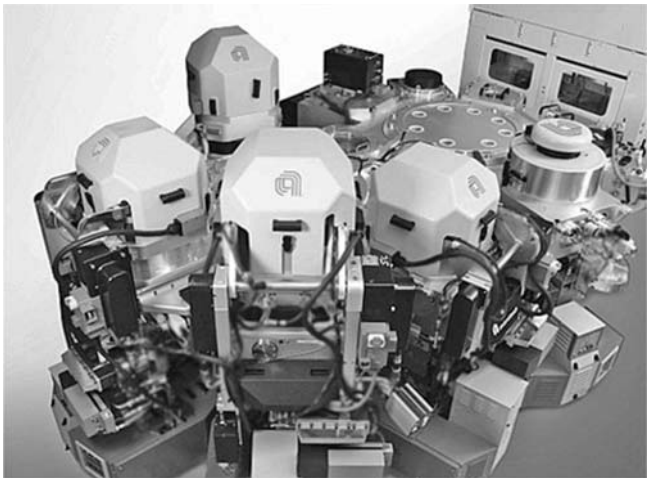


Рис. 1. Установка Applied Materials ENDURA

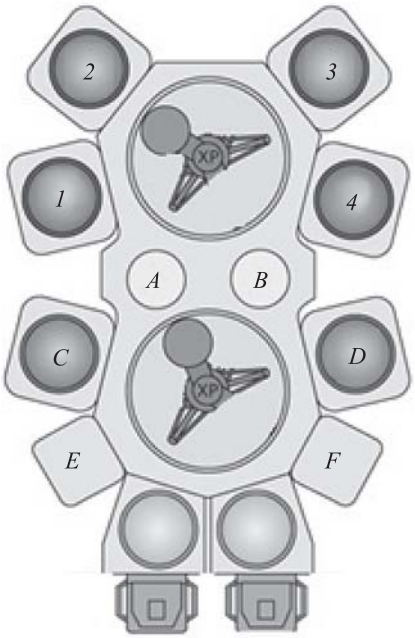


Рис. 2. Общий вид установки ENDURA

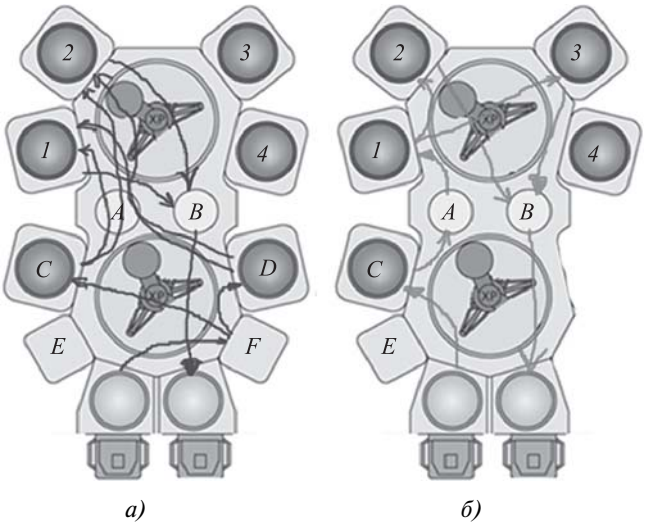


Рис. 3. Рецепты установок № 4 (*а*) и 2 (*б*)

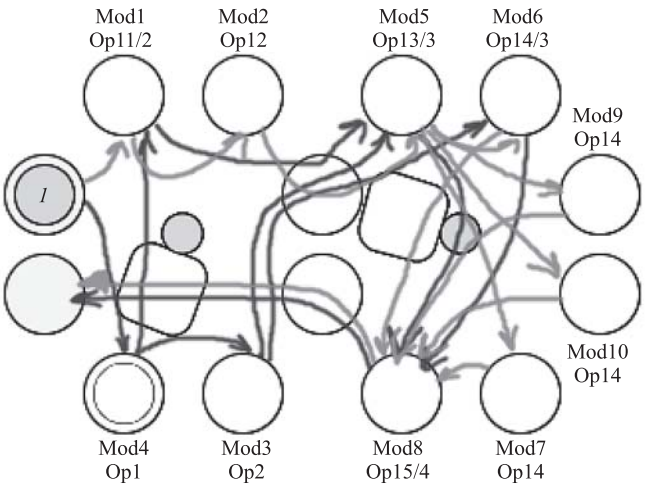


Рис. 4. Предлагаемая установка с совмещёнными потоками полуфабрикатов

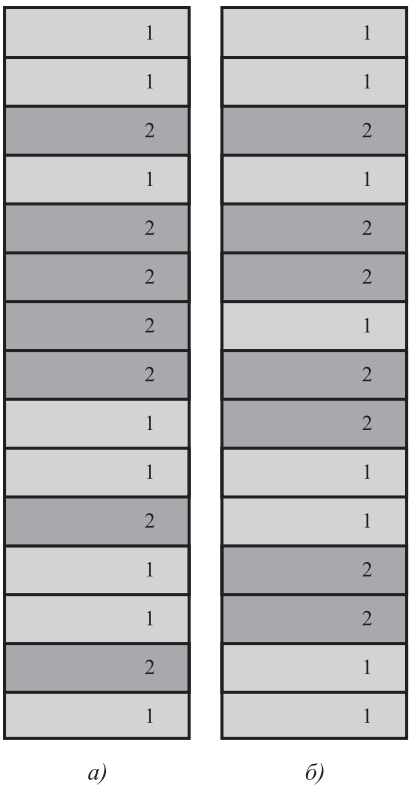


Рис. 5. График запуска, соответствующий максимальной (*а*) и минимальной (*б*) производительности

ществующими на 18 %. Следует отметить, что целью статьи не являлось комплексное исследование (и нахождение оптимальных вариантов кластерных установок) технологического процесса производства процессора, в частности, операций цеха термического напыления, а также нахождение компоновки максимальной производительности. Необходимо было показать, что при определённых, конечно заданных и полностью детерминированных условиях (ограниченное количество последовательно следующих друг за другом операций) существуют наиболее и наименее оптимальные варианты компоновки оборудования, которые можно рассчитать с помощью имитационного моделирования. В данной работе не утверждается, что предложенный вариант — самый оптимальный, так как нахождение наиболее оптимальной компоновки для указанных операций и рецептов выходит за рамки данного исследования ввиду своей трудоёмкости.

Заключение. С помощью имитационного моделирования были реализованы различные сценарии компоновки многокластерной установки с двумя потоками полуфабрикатов в системе. Таким образом, при эксплуатации уже существующей установки целесообразно использовать имитационное моделирование для поиска наиболее оптимальной компоновки и графика запуска полуфабрикатов.

Библиографические ссылки

1. **Kohn R., Noack D., Mosinski M., Zhou Z., Rose O.** Evaluation of Modeling, Simulation and Optimization Approaches for Work Flow Management in Semiconductor Manufacturing // Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2009. P. 1592—1600.

2. **Куликов И.Н.** Автоматизированное формирование структур мультикластерных технологических комплексов // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 2. С. 63—73.

3. **Niedermayer H.A., Rose O.** Simulation-based Analysis of the Cycle Time of Cluster Tools in Semiconductor Manufacturing // Proceedings of the Annual IIE Industrial Engineering Research Conference. Houston, Texas, 2004.

4. **Noack D., Gan B.P., Lendermann P., Rose O.** An Optimization Framework for Waferfab Performance Enhancement // Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2008. P. 2194—2200.

5. **Noack D., Mosinski M., Rose O., Lendermann P., Gan B.P.** Challenges and Solution Approaches for the Online Simulation of Semiconductor Wafer Fabs // Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 2011. P. 1845—1856.

6. **Куликов И.Н., Рябов В.Т., Шубников А.В.** Имитационное моделирование кластерного технологического оборудования в полупроводниковом производстве // Наноинженерия. 2013. № 9 (27) С. 3—6.

7. **Куликов И.Н.** Имитационное моделирование управления потоками полуфабрикатов в многокластерном технологическом комплексе // Образование. Наука. Научные кадры. 2015. № 5. С. 271—275.

Ссылка для цитирования

Куликов И.Н., Колесник Л.Л. Повышение производительности эксплуатируемого многокластерного технологического комплекса с использованием имитационного моделирования потоков полуфабрикатов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 269—271.

УДК 621.865.8

С.И. Савин, канд. техн. наук, **Л.Ю. Ворочаева,** канд. техн. наук
(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)

savinswsu@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ШАГАЮЩЕГО РОБОТА С УПРУГИМИ ЗВЕНЬЯМИ ПОСРЕДСТВОМ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИИ

Рассмотрен подход к управлению шагающим роботом, в конструкцию которого введён упругий элемент. Подход основан на решении задачи численной оптимизации траектории робота, сформулированной как квадратичная программа. Представлены результаты численного моделирования, демонстрирующие работоспособность предложенного подхода и свидетельствующие об устойчивости предложенной процедуры к начальным отклонениям.

Ключевые слова: шагающий механизм; упругий элемент; оптимизация траектории; выпуклое программирование.

The approach to the management of a walking robot, in the construction of which an elastic element is introduced, is considered. The approach is based on the solution of the numerical optimization problem for the robot trajectory, formulated as a quadratic program. The numerical simulations results, which demonstrate the proposed approach operability and indicate the stability of the proposed procedure to the initial deflection are presented.

Keywords: walking mechanism; elastic element; trajectory optimization; convex programming.

Введение. Шагающие роботы представляют собой широкий класс механизмов, реализующих движение с периодическим контактом с опорной поверхностью. Такой способ перемещения позволяет им передвигаться по опорным поверхностям сложной формы, включая поверхности, характерные для урбанизированных территорий, пересечённой местности [1]. Шагающие системы могут применяться для решения широкого круга задач: от автоматизации сельскохозяйственных работ до создания медицинских средств реабилитации, проведения подводных и внутритрубных работ [2].

Одна из особенностей шагающих роботов — их кинематическая структура, зачастую включающая набор последовательно соединённых звеньев. Характерным примером являются антропоморфные роботы, чьи ноги включают от трёх до шести звеньев, последовательно соединённых с помощью вращательных шарниров [3]. При проектировании такого рода механизмов важным является снижение их массы и габаритных размеров. Это приводит к тому, что во многих конструкциях антропоморфных механизмов используются элементы с упругими свойствами. В ряде случаев упругие элементы вводятся в конструкции шагающих роботов преднамеренно в целях повышения энергоэффективности и надёжности конструкции [4]. Упругие элементы также могут использоваться как часть трансмиссии робота, что позволяет оптимизировать расположение приводов без существенного увеличения массы механизма [5].

Организация эффективного управления шагающими роботами с упругими элементами является открытой научной проблемой. Данные механизмы можно рассматривать как системы с дефицитом управляющих воздействий (системы, где число управляемых величин превышает число управляющих воздействий), что позволяет использовать разработанные для таких систем подходы [6]. Одним из этих подходов является оптимизация траектории движения робота [7]. В данном случае под оптимизацией траектории подразумевается решение задачи оптимального выбора функций времени, описывающих перемещение системы и управляющие воздействия, причём эти функции должны удовлетворять динамике механической системы и переводить её из заданного начального положения в желаемое конечное. Решение указанной задачи позволяет получить задающие воздействия для системы управления по обратной связи, а также найти управляющие воздействия, обеспечивающие нужное перемещение системы. Данная задача может решаться многократно через заданные

временны́е интервалы, что делает этот метод сходным с MPC-управлением (от англ. Model Predictive Control).

Алгоритмы управления шагающими роботами, основанные на оптимизации траектории, можно найти в работах [7, 8]. В этих работах существенное внимание уделяется вопросу построения метода оптимизации траектории, позволяющего учитывать появление и снятие механических связей, возникающих при контакте робота с опорной поверхностью. Следует отметить, что вопросы использования оптимизации траекторий для управления шагающим роботом с упругими звеньями требуют отдельного рассмотрения.

В настоящей работе изучается возможность использования метода оптимизации траектории для управления конечностью шагающего механизма при условии, что в одно из звеньев робота введён упругий элемент. Использованные математические модели выбраны так, чтобы продемонстрированные результаты можно было легко обобщить как для нижних, так и для верхних конечностей шагающих роботов (их «ног» и «рук»).

Модель робота. Рассмотрим конечность шагающего робота, состоящую из четырёх последовательно расположенных звеньев, три из которых соединены вращательными шарнирами, а одна пара – упругим элементом. Расчётная схема робота показана на рис. 1, где использованы следующие обозначения: $O_1 ... O_3$ — шарниры; K_1, K_2 — точки закрепления упругого элемента; φ_i — углы, задающие ориентацию звеньев робота. Звенья имеют длины l_i и массы m_i. Положение точек K_1, K_2 задано радиус-векторами $\mathbf{r}_{K1}$, $\mathbf{r}_{K2}$:

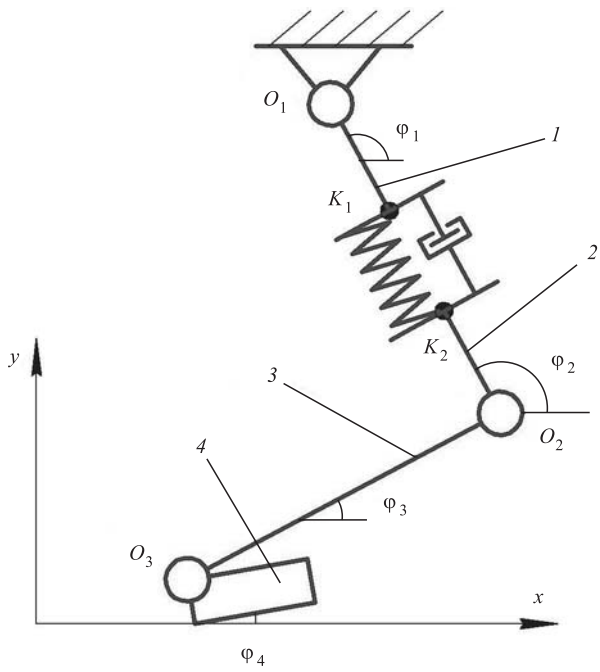


Рис. 1. Расчётная схема конечности шагающего робота: *1...4* — первое, ..., четвёртое звенья соответственно

$$\mathbf{r}_{K1} = \mathbf{r}_{O1} + \mathbf{T}_{\varphi 1}\begin{bmatrix} 0 \\ -L_1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{r}_{K2} = \begin{bmatrix} x_{K2}^0 + x_{K2} \\ y_{K2}^0 + y_{K2} \end{bmatrix},$$

где L_1 — длина первого звена; $\mathbf{r}_{O1}$ — радиус-вектор, описывающий положение точки O_1; $\mathbf{T}_{\varphi 1}$ — матрица поворота на угол φ_1; x_{K2}, y_{K2} — обобщённые координаты; x_{K2}^0, y_{K2}^0 — декартовы координаты точки K_2 при начальном положении механизма.

Положим, что сила упругости $\mathbf{f}_{12}$ и крутящий момент τ_{12}, действующие на первое тело со стороны упругого элемента, задаются выражениями

$$\mathbf{f}_{12} = k_{pf}(\mathbf{r}_{K2} - \mathbf{r}_{K1} + \mathbf{r}_{K1K2}^0) + k_{df}(\dot{\mathbf{r}}_{K2} - \dot{\mathbf{r}}_{K1});$$

$$\tau_{12} = k_{p\tau}(\varphi_2 - \varphi_1 + \varphi_{21}^0) + k_{d\tau}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1),$$

где k_{pf}, $k_{p\tau}$ — коэффициенты упругости; k_{df}, $k_{d\tau}$ — коэффициенты вязкого сопротивления; $\mathbf{r}_{K1K2}^0$, φ_{21}^0 — константы, определяющие взаимное положение и ориентацию первого и второго тел, при которых упругий элемент находится в недеформированном состоянии.

Положение робота описывается шестью обобщёнными координатами: $\varphi_1 ... \varphi_4$, x_{K2} и y_{K2}. Для описания модели робота в пространстве состояний будем использовать вектор координат $\mathbf{x}$, заданный как

$$\mathbf{x} = [\varphi_1 \ldots \varphi_4 \; x_{K2} \; y_{K2} \; \dot{\varphi}_1 \ldots \dot{\varphi}_4 \; \dot{x}_{K2} \; \dot{y}_{K2}]^{\mathrm{T}}.$$

Метод оптимизации траектории. Рассмотрим задачу поиска временны́х зависимостей, обеспечивающих переход механизма из начального положения $\mathbf{x}(0)$ в желаемое конечное положение $\mathbf{x}^*(t_f)$. Для этого рассмотрим линеаризованную модель робота

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{c}, \tag{1}$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{c}$ — матрицы и вектор линеаризованной модели робота; $\mathbf{u}$ — вектор управляющих воздействий.

Решением рассматриваемой задачи являются функции $\mathbf{x}^*(t)$ и $\mathbf{u}^*(t)$, удовлетворяющие начальным условиям и уравнениям динамики (1), доставляющие минимум заданной целевой функции. Для того чтобы иметь возможность использовать численные методы теории выпуклого

программирования, запишем уравнения динамики (1) в дискретной форме и будем искать последовательности чисел $\mathbf{x}_i^*$ и $\mathbf{u}_i^*$, обеспечивающие их выполнение. Дискретная форма уравнений динамики (1) имеет вид

$$\mathbf{x}_{i+1} = (\mathbf{I} + \Delta t\mathbf{A})\mathbf{x}_i + \Delta t\mathbf{B}\mathbf{u}_i + \Delta t\mathbf{c}, \qquad (2)$$

где Δt — шаг интегрирования; $\mathbf{I}$ — единичная матрица.

Будем использовать квадратичную аддитивную целевую функцию

$$J = J_b + J_n + J_u,$$

в которой J_b, J_n, J_u — выпуклые функции, связанные с минимизацией ошибки по конечному положению робота, разницы между соседними положениями робота и величины используемых управляющих воздействий:

$$\begin{aligned} J_b &= (\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_m^*)^{\mathrm{T}}\mathbf{S}_b^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_b\mathbf{S}_b(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_m^*); \\ J_n &= \sum_{i=1}^{m-1}(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i+1})^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}_n(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i+1}); \qquad (3) \\ J_u &= \sum_{i=1}^{m}\mathbf{u}_i^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\mathbf{u}_i, \end{aligned}$$

где $\mathbf{S}_b$ — матрица выбора, позволяющая выбирать, какие из компонент вектора $\mathbf{x}$ должны достигнуть заданных значений; $\mathbf{Q}_b$, $\mathbf{Q}_n$, $\mathbf{R}$ — положительно определённые матрицы коэффициентов; m — число точек на дискретном представлении траектории движения робота.

Заметим, что в зависимости от выбора параметров k_{pf}, k_{df}, $k_{p\tau}$ и $k_{d\tau}$ дискретная динамическая система (2) может стать жёсткой [9]. При использовании жёстких уравнений динамики для формирования линейных связей в задаче оптимизации численные методы могут демонстрировать неустойчивость. Для решения этой проблемы уравнения связей, реализующие ограничения, обусловленные динамикой системы, могут быть записаны с использованием неявной схемы интегрирования:

$$(\mathbf{I} - \Delta t\mathbf{A})\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i - \Delta t\mathbf{B}\mathbf{u}_i = \Delta t\mathbf{c}.$$

Таким образом, оптимизация траектории движения робота может быть реализована как задача квадратичного программирования:

$$\underset{\mathbf{x}_i,\mathbf{u}_i}{\text{minimize}} \quad J$$
$$\text{subject to:} \quad \begin{cases} \mathbf{x}_1 = \mathbf{x}(0); \\ (\mathbf{I} - \Delta t\mathbf{A})\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i - \Delta t\mathbf{B}\mathbf{u}_i = \Delta t\mathbf{c}. \end{cases} \qquad (4)$$

Используя интерполяцию решений $\mathbf{x}_i^*$ и $\mathbf{u}_i^*$ сплайнами, можем получить аппроксимацию искомых функций $\mathbf{x}^*(t)$ и $\mathbf{u}^*(t)$. Ниже будут приведены примеры траекторий, полученных путём решения данной задачи.

Результаты решения задачи оптимизации. Рассмотрим использование предложенного алгоритма управления для решения задачи управления роботом в процессе совершения шага. Моделирование проводили для следующих параметров математической модели: $m_{1-3} = 10$ кг; $m_4 = 5$ кг; $l_{1-2} = 0{,}3$ м; $l_3 = 0{,}6$ м; $k_{pf} = 10^4$ Н/м; $k_{df} = 0{,}5\cdot10^3$ Н·с/м; $k_{p\tau} = 10^4$ Н/рад и $k_{d\tau} = 0{,}5\cdot10^3$ Н·с/рад. Линеаризацию уравнений динамики проводили для начального положения механизма. Описание процедуры построения и линеаризации уравнений движения для механизмов такого рода можно найти в работе [10].

При построении задачи оптимизации (4) использовали весовые матрицы $\mathbf{Q}_b = 10^2\mathbf{I}$, $\mathbf{Q}_n = \mathbf{I}$ и $\mathbf{R} = 10^{-5}\mathbf{I}$. Матрицу $\mathbf{S}_b$ выбирали так, чтобы конечные значения обобщённых скоростей не учитывались при вычислении целевой функции J.

На рис. 2 показаны начальное и конечное положения ноги робота в процессе совершения шага, полученные с помощью оптимизации траектории.

На рис. 3 показаны временны́е зависимости углов, определяющих ориентацию звеньев ро-

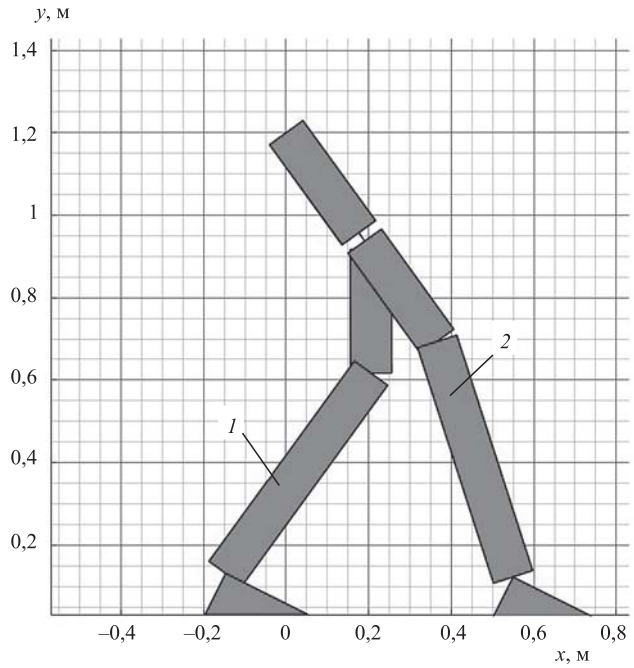


Рис. 2. Начальное (*1*) и конечное (*2*) положения ноги робота

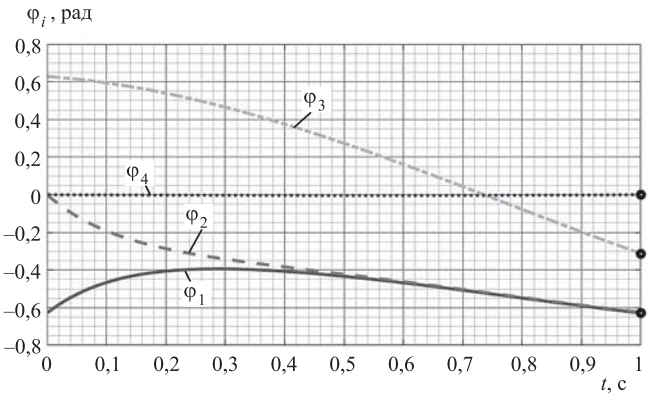


Рис. 3. Временны́е зависимости углов $\varphi_i(t)$ (чёрные маркеры показывают желаемые конечные значения углов, конечные значения φ_1 и φ_2 совпадают)

бота в процессе совершения шага. При решении задачи определяли 24 точки (m = 24) на траектории движения робота, а затем полученные последовательности точек интерполировали кусочно-полиномиальными функциями с полиномами степени не выше 5-й.

Можно заметить, что угол $\varphi_4(t)$, определяющий ориентацию стопы робота, чьи значения в начальном и конечном положении ноги совпадают, оставался неизменным в процессе движения. Такого рода походка отличается от типичного характера движения человека, но соответствует многим походкам, реализуемым шагающими роботами [8].

На рис.4 показаны временны́е зависимости первых производных углов $\dot{\varphi}_i(t)$ (обобщённых скоростей), также полученные интерполяцией решения задачи оптимизации (4) для указанных выше значений параметров модели и целевой функции.

Графики обобщённых скоростей $\dot{\varphi}_i(t)$, показанные на рис. 4, демонстрируют разрывы, связанные с тем, что использованный алгоритм интерполяции не гарантировал обеспечения дифференцируемости получаемой кусочно-полиномиальной функции. Аналогичные разрывы наблюдаются и на временны́х зависимостях управляющих воздействий $u_i(t)$, показанных на рис. 5.

Для алгоритмов управления, чувствительных к наличию разрывов и недифференцируемых участков функций, представляющих задающие и управляющие воздействия, может потребоваться использование методов интерполяции, обеспечивающих получение гладких функций.

Следует отметить, что с точки зрения вычислительной сложности желательным является уменьшение числа точек на траектории робота, получаемой путём решения задачи (4), тогда как с точки зрения качества получаемых интерполяций желательным является повышение числа таких точек.

Рассмотрим, как начальное положение робота влияет на отклонение его конечного положения от желаемого. Обозначим величину этого отклонения как ε:

$$\varepsilon = \|\mathbf{S}_b(\mathbf{x}_m - \mathbf{x}_m^*)\|.$$

Начальное положение робота будем задавать как $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}(0) + \mathbf{S}_r\mathbf{x}_r$, где $\mathbf{x}_r$ — случайный вектор, элементы которого с равной вероятностью принимают значения из диапазона $[-x_{r,\max}\ x_{r,\max}]$, а $\mathbf{S}_r$ — матрица выбора. Обозначим модуль вектора $\mathbf{x}_r$ как δ.

Рассмотрим случай, когда $x_{r,\max}$ = 0,5, а $\mathbf{S}_r = [\mathbf{I}_{4\times4}\quad \mathbf{0}_{4\times8}]^{\mathrm{T}}$, что означает, что начальные значения лишь первых четырёх обобщённых координат изменялись прибавлением случайной величины $\mathbf{x}_r$. На рис. 6 показана зависимость конечного отклонения ε от начального отклонения δ.

Можно заметить, что разброс значений ε, а также достигаемые максимальные значения

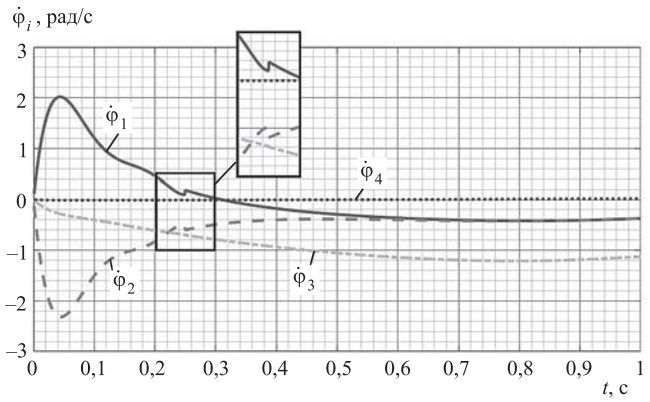


Рис. 4. Временны́е зависимости обобщённых скоростей $\dot{\varphi}_i(t)$

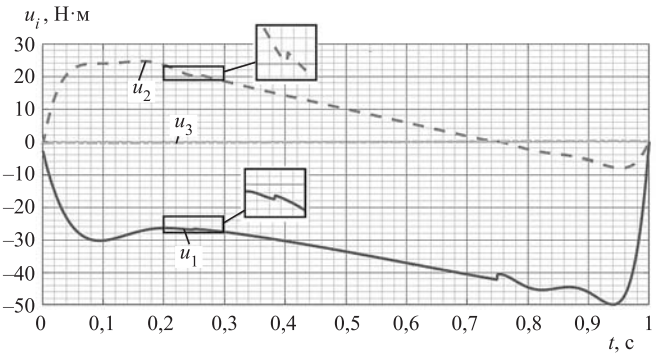


Рис. 5. Временны́е зависимости управляющих воздействий $u_i(t)$

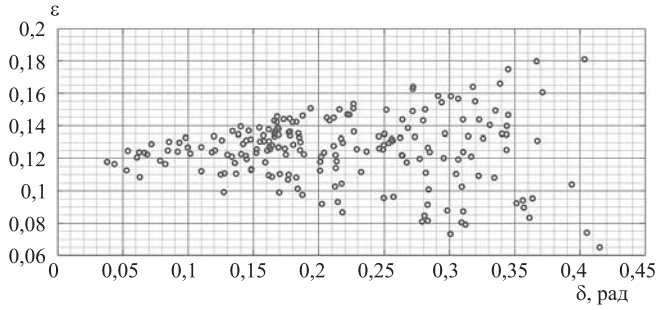


Рис. 6. Зависимость конечного отклонения ε от начального отклонения δ

этой величины растут с увеличением δ. При этом для любого значения δ из рассмотренного диапазона можно найти верхнюю границу для получаемых значений ε, что свидетельствует об устойчивости предложенной процедуры оптимизации траектории к начальным отклонениям.

Характерной особенностью полученного распределения ε(δ) является то, что с ростом δ минимальные значения, достигаемые величиной ε, уменьшаются. Это связано с тем, что среди возможных начальных положений $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}(0) + \mathbf{S}_r\mathbf{x}_r$ встречаются те, которые позволяют алгоритму построить лучшие траектории в сравнении с траекторией, соответствующей случаю $\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}(0)$.

Рассмотрим влияние выбранного значения $\mathbf{Q}_b$ на величину отклонения ε. Будем рассматривать $\mathbf{Q}_b = \omega\mathbf{I}$, где ω — скалярный коэффициент. На рис. 7 показана зависимость ε(ω) в логарифмическом масштабе. Видно, что с ростом коэффициента целевой функции ω происходит быстрое снижение отклонения ε. Это происходит за счёт существенного возрастания величин управляющих воздействий, что проиллюстрировано на рис. 8.

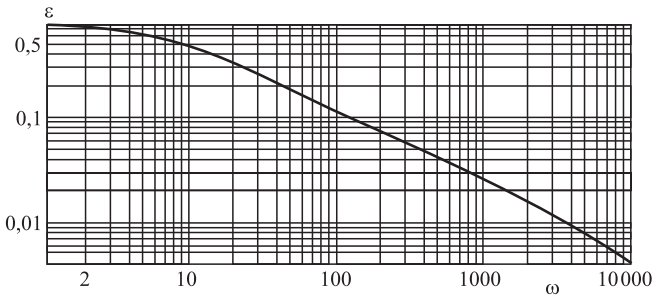


Рис. 7. Зависимость отклонения ε от коэффициента целевой функции ω

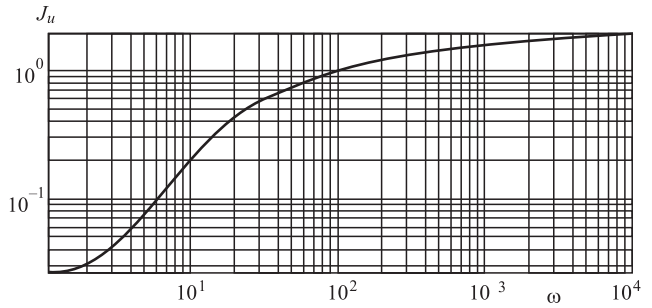


Рис. 8. Зависимость получаемого значения целевой функции J_u от коэффициента ω

Как показано на рис. 8, величина целевой функции J_u, связанной с величинами управляющих воздействий, многократно возрастает с ростом коэффициента ω. Таким образом, увеличение этого коэффициента позволяет управлять точностью конечного положения робота, но приводит к резкому увеличению требуемых значений управляющих воздействий. На практике на управляющие воздействия могут быть наложены ограничения в форме неравенств, связанные с ограничением мощности используемых приводов, что может исказить показанные выше зависимости.

Заключение. В работе предложен способ управления шагающим роботом, основанный на оптимизации траектории — решении задачи выбора последовательности положений и управляющих воздействий, переводящих робота из начального положения в желаемое конечное с учётом динамики робота. Для записи ограничений, связанных с динамикой робота, использовали неявную форму метода интегрирования Эйлера, что позволило применять жёсткие (в смысле теории дифференциальных уравнений) уравнения динамики механизма с упругим элементом в формулировке математической программы, сохранив устойчивость численной процедуры, использовавшейся для её решения. Результаты моделирования показали работоспособность предложенного способа управления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00140\18.

Библиографические ссылки

1. **Павловский В.Е.** О разработках шагающих машин // Препринты Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. 2013. № 101. 32 с.

2. **Savin S.I., Vorochaeva L.Yu.** Footstep planning for a six-legged in-pipe robot moving in spatially curved pipes // Proceedings of Control and Communications (SIBCON) Intern. Siberian Conf. Astana. Kazakhstan. 2017.

3. **Jatsun S., Savin S., Yatsun A.** A Control Strategy for a Lower Limb Exoskeleton with a Toe Joint // Proceedings of Intern. Conf. on Interactive Collaborative Robotics. Springer, Cham. 2016. P. 1—8.

4. **Robinson D.W., Pratt J.E., Paluska D.J., Pratt G.A.** Series elastic actuator development for a biomimetic walking robot // Proceedings IEEE/ASME Intern. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta. GA. USA. 1999. P. 561—568.

5. **Савин С.И.** Динамика многозвенного аппарата с гибкими упругими звеньями для перемещения по трубопроводам: дис. ... канд. техн. наук. Курск, Юго-Западный гос. ун-т, 2014.

6. **Spong M.W.** Underactuated mechanical systems // Control problems in robotics and automation. Springer, Berlin, Heidelberg. 1998. P. 135—150.

7. **Posa M., Cantu C., Tedrake R.** A direct method for trajectory optimization of rigid bodies through contact // Intern. J. of Robotics Research. 2014. No. 33(1). P. 69—81.

8. **Kuindersma S., Deits R., Fallon M., Valenzuela A., Dai H., Permenter F., Koolen T., Marion P., Tedrake R.** Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot // Autonomous Robots. 2016. No. 40(3). P. 429—455.

9. **Butcher J.C.** Numerical methods for ordinary differential equations. John Wiley&Sons. Chichester. 2016. 463 p.

10. **Jatsun S., Savin S., Yatsun A.** Comparative analysis of iterative LQR and adaptive PD controllers for a lower limb exoskeleton // Proceedings of IEEE Intern. Conf. Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Chengdu. China. 2016. P. 239—244.

Ссылка для цитирования

Савин С.И., Ворочаева Л.Ю. Управление движением шагающего робота с упругими звеньями посредством оптимизации траектории // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 272—277.

УДК 681.5:669.295

Ю.П. Кирин, В.А. Тихонов, канд. техн. наук
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Березниковский филиал, г. Березники)

vtihonov@bf.pstu.ru

ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИТУАЦИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЁННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ ДВУХПОЗИЦИОННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Предложен метод идентификации ситуаций функционирования неопределённого динамического объекта по автоколебательным режимам системы двухпозиционного регулирования температуры. В результате параметрической идентификации модели объекта определены функциональные зависимости изменения параметров автоколебаний в системе двухпозиционного регулирования температуры и действующего на объект возмущения. Указанные зависимости использованы для математического описания и идентификации ситуаций функционирования неопределённых динамических объектов в системах двухпозиционного регулирования процессов производства губчатого титана.

Ключевые слова: неопределённый динамический объект; система двухпозиционного регулирования; автоколебания; ситуация функционирования; идентификация.

A method for functioning situations identification of an indefinite dynamic object according to the self-oscillating regimes of a two-position control system for temperature regulation is proposed. The functional dependences of the self-oscillations parameters changes in the system of two-position temperature regulation and disturbance acting on the object are determined as a result of the parametric identification of the object model. These dependences are used for the mathematical description and identification of functioning situations of uncertain dynamic objects in the systems of two-position regulation of spongy titanium production processes.

Keywords: undefined dynamic object; system of two-position regulation; self-oscillation; functioning situation; identification.

Введение. Современный подход к синтезу систем управления в условиях неопределённости предусматривает определение ситуаций функционирования (СФ) технологических процессов. При этом в процессе работы автоматической системы возникает необходи-

мость идентификации СФ в текущий момент времени путём получения информации в ходе наблюдений за измеряемыми выходными координатами технологических процессов в условиях размытости границ перехода от одних СФ к другим. Результаты идентификации СФ используются для совершенствования управления технологическими процессами [1].

Развитие теории двухпозиционного регулирования идёт по пути создания эффективных систем управления сложными объектами в условиях частичной или полной неопределённости информации о динамических свойствах объектов и среды их функционирования [2].

Одним из основных этапов решения этой проблемы является построение математических моделей, описывающих СФ неопределённых динамических объектов. Большинство промышленных объектов функционирует в условиях неопределённости в замкнутых системах многоканального двухпозиционного регулирования, построенных на микропроцессорных контроллерах [3]. Особенность управления такими объектами состоит в том, что наличие случайным образом изменяющихся неконтролируемых возмущений, дрейф статических и динамических характеристик оборудования оказывают существенное влияние на рабочие режимы многоканального двухпозиционного регулирования, которые представляют собой автоколебания сложной формы с переменными параметрами. При этом условия функционирования неопределённых динамических объектов естественным образом отражаются в динамике многоканального двухпозиционного регулирования. Исследуя экспериментально эволюцию автоколебаний в системе многоканального двухпозиционного регулирования (СМДР) с реальным неопределённым динамическим объектом (НДО), можно оценить его поведение и получить информацию, необходимую для математического описания СФ НДО [4].

Рассмотрим метод идентификации СФ НДО по автоколебательным режимам СМДР.

Структурная схема многоканального двухпозиционного регулирования НДО. В представленной на рис. 1 схеме НДО функционирует в режиме нормальной эксплуатации в замкнутом контуре многоканального двухпозиционного регулирования [4].

На входе НДО действует неконтролируемое возмущение $z(t)$. Включением и выключением входной величины $x(t)$ многоканальный двухпозиционный регулятор (МДР) поддерживает выходную величину $y(t)$ НДО на заданном уровне $y_з$ в соответствии с алгоритмом

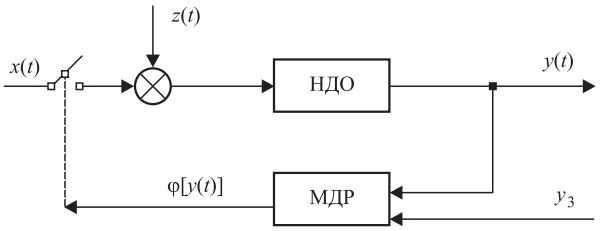


Рис. 1. Структурная схема многоканального двухпозиционного регулирования НДО

$$\varphi[y(t)] = \begin{cases} x(t) \text{ при } y(t) < y_3 - \Delta y_0 \text{ и} \\ y_3 - \Delta y_0 \leqslant y(t) \leqslant y_3 + \Delta y_0,\ y'(t) > 0; \\ 0 \text{ при } y(t) > y_3 + \Delta y_0 \text{ и} \\ y_3 - \Delta y_0 \leqslant y(t) \leqslant y_3 + \Delta y_0,\ y'(t) < 0, \end{cases}$$

где $\varphi[y(t)]$ — выходная величина МДР; Δy_0 — зона нечувствительности МДР; $y'(t)$ — скорость изменения выходной величины.

Таким образом, при включении $x(t)$ на входе НДО действует разность $x(t)$ — $z(t)$, при выключении $x(t)$ поведение НДО определяется возмущающим воздействием $z(t)$. СМДР при этом работает в режиме автоколебаний.

Структура математической модели НДО. Структура математической модели НДО представлена дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами [5]:

$$\frac{d[y(t)]}{dt} = K_0(t)\{x[t - \tau(t)] - z(t)\}, \qquad (1)$$

где $y(t)$, $x(t)$ — выходная и входная величины НДО соответственно; $K_0(t)$, $\tau(t)$, $z(t)$ — коэффициент усиления, время запаздывания и возмущение НДО.

Неопределённость модели динамики объекта заключается в том, что коэффициенты $K_0(t)$, $\tau(t)$, $z(t)$ дифференциального уравнения (1) являются некоторыми неизвестными функциями времени.

Определение числовых значений неизвестных коэффициентов дифференциального уравнения является задачей параметрической идентификации модели НДО в СМДР.

Описание автоколебаний в СМДР НДО. Для решения задачи параметрической идентификации модели в СМДР НДО приняты следующие допущения.

Предполагается, что в течение периода автоколебаний динамические свойства и возмущение НДО остаются постоянными. Иначе говоря, период автоколебаний рассматри-

вается в качестве интервала идентификации (квазистационарности) НДО, а сам НДО в процессе функционирования на разных интервалах идентификации представляет собой семейство квазистационарных объектов управления. В этом случае автоколебания на интервалах идентификации НДО описываются следующей системой конечных уравнений [5]:

$$\Delta y_{(+)} = \Delta y_0 + \tau K_0 (x - z); \quad (2)$$

$$\Delta y_{(-)} = \Delta y_0 + \tau K_0 z; \quad (3)$$

$$T_{\text{on}} = \tau + \frac{2\Delta y_0 + \tau K_0 z}{K_0 (x - z)}; \quad (4)$$

$$T_{\text{off}} = \tau + \frac{2\Delta y_0 + \tau K_0 (x - z)}{K_0 z}, \quad (5)$$

где $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$ — амплитуды положительного и отрицательного отклонений выходной величины от $y_з$ соответственно; T_{on}, T_{off} — время включений и выключений входной величины НДО.

Решение задачи параметрической идентификации модели реального НДО. В качестве примера решения задачи параметрической идентификации модели реального НДО рассмотрим зону нагрева промышленного аппарата вакуумной сепарации губчатого титана [5].

В соответствии с принятыми на рис. 1 обозначениями в данном случае под $x(t)$ и $y(t)$ подразумевают мощность нагревателя и температуру зоны, под $y_з$ — заданное значение температуры зоны, под $z(t)$ — тепло, потребляемое зоной нагрева на испарение из титановой губки примесей магния и хлорида магния. Соответственно, в системе уравнений (2)—(5) $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$ — амплитуды положительного и отрицательного отклонений температуры от $y_з$; T_{on}, T_{off} — время включения и выключения нагревателя зоны.

Предварительно методом пассивного эксперимента исследована динамика многоканального двухпозиционного регулирования температуры в рабочих режимах зоны нагрева аппарата вакуумной сепарации. В МДР (микропроцессорном контроллере) измерены значения параметров автоколебаний $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$, T_{on}, T_{off} на разных интервалах идентификации зоны нагрева (см. таблицу).

Задача параметрической идентификации модели НДО сформулирована следующим образом: по измеренным в эксперименте значениям автоколебаний температуры $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$, T_{on}, T_{off} и известным x, Δy_0 (x = 130 кВт, Δy_0 = = 2 °С) требуется определить из системы уравнений (2)—(5) неизвестные коэффициенты K_0, z, τ дифференциального уравнения (1).

Система (2)—(5) является переопределённой (на четыре уравнения (2)—(5) — три неизвестных).

Неизвестные K_0, z, τ определены путём применения встроенной функции Minimize средств MathCAD из условия минимума отклонений расчётных и измеренных в эксперименте параметров автоколебаний температуры (см. таблицу).

Математическое описание СФ НДО. Анализ полученных в таблице результатов параметрической идентификации позволяет сделать вывод о том, что коэффициенты $K_0(t)$ и

Экспериментальные данные автоколебательных режимов многоканального двухпозиционного регулирования температуры и результаты параметрической идентификации модели зоны нагрева аппарата сепарации

Номер интервала идентификации	Экспериментальные значения параметров СМДР				Результаты параметрической идентификации модели		
	$\Delta y_{(+)}$, °С	$\Delta y_{(-)}$, °С	T_{on}, с	T_{off}, с	$K_0 \cdot 10^{-3}$, °С/с·кВт	τ, с	z, кВт
1	5,5	15,4	221,7	60,2	3,4	38,5	102,1
2	6,3	14,7	182,3	61,2	3,5	37,1	97,3
3	6,7	13,7	151,1	60,8	3,6	35,4	92,9
4	10,1	10,1	92,4	92,4	3,4	36,8	65,0
5	14,5	7,1	61,1	152,8	3,4	35,6	37,2
6	15,8	6,2	61,0	203,1	3,6	38,4	30,2
7	16,6	5,6	55,1	220,2	3,7	36,1	26,1
8	16,9	5,4	55,3	251,2	3,7	38,2	24,1

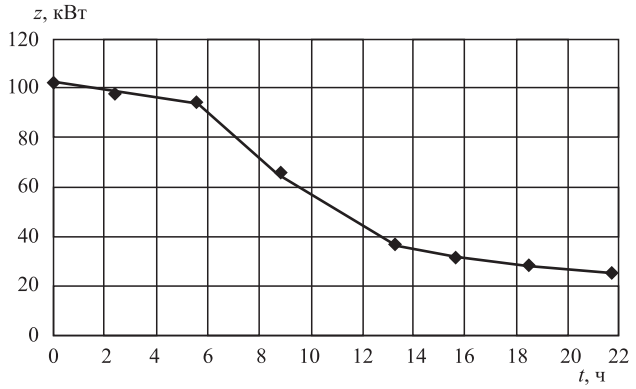


Рис. 2. Изменение тепла, потребляемого зоной нагрева аппарата сепарации на испарение из титановой губки примесей магния и хлорида магния:
t — время процесса сепарации

$\tau(t)$, первоначально представленные в модели (1) НДО как функции времени, изменяются незначительно и могут быть приняты постоянными величинами.

Существенно изменяется (снижается) возмущающее воздействие z (рис. 2).

В связи с этим исходную модель НДО можно записать в следующем виде:

$$\frac{d[y(t)]}{dt} = K_0[x(t-\tau) - z(t)]. \qquad (6)$$

Как видно из выражения (6), условия функционирования НДО зависят от возмущения $z(t)$. Это обстоятельство имеет большое практическое значение для построения системы идентификации СФ НДО, информация о которых формируется путём прямого или косвенного измерения $z(t)$ и используется в автоматизированных системах для поддержки принимаемых технологом управленческих решений [6].

При постоянных K_0, τ, x, Δy_0 системы уравнений (2)—(5) представляют собой функциональные зависимости изменения параметров автоколебаний от $z(t)$ и могут быть записаны в следующем виде:

$$\Delta y_{(+)}(z) = \Delta y_0 + \tau K_0[x - z(t)]; \qquad (7)$$

$$\Delta y_{(-)}(z) = \Delta y_0 + \tau K_0 z(t); \qquad (8)$$

$$T_{\text{on}}(z) = \tau + \frac{2\Delta y_0 + \tau K_0 z(t)}{K_0[x - z(t)]}; \qquad (9)$$

$$T_{\text{off}}(z) = \tau + \frac{2\Delta y_0 + \tau K_0[x - z(t)]}{K_0 z(t)}. \qquad (10)$$

Указанные зависимости позволяют отслеживать текущие СФ по результатам измерения параметров автоколебаний и служат основой для построения алгоритмов идентификации СФ НДО. Таким образом, параметры автоколебаний используются в качестве идентификационных признаков для определения СФ НДО.

В частности, для нашего примера эти зависимости используются для контроля стадий и момента окончания процесса вакуумной сепарации губчатого титана и имеют следующий вид (рис. 3) [4].

Для построения графиков (см. рис. 3) использованы средние арифметические значения K_0 и τ, рассчитанные на интервалах идентификации зоны нагрева (см. таблицу), равные $3{,}55 \cdot 10^{-3}$ °С/с·кВт и 37 с соответственно.

Адекватность модели (6) реальным СФ вакуумной сепарации подтверждена сопоставлением результатов измерений параметров автоколебаний температуры в зонах нагрева промышленного аппарата сепарации и результатов, полученных по функциональным зависимостям (7)—(10).

Таким образом, задача идентификации СФ сводится к измерению и анализу параметров автоколебаний в СМДР НДО, отражающих характер изменения $z(t)$.

Построение системы идентификации СФ НДО. Система идентификации встраивается непосредственно в контур многоканального двухпозиционного регулирования НДО. Для этого необходимо представленную на рис. 1 структурную схему дополнить устройством измерения параметров автоколебаний (УИПА) и оценивающим устройством — идентификатором СФ (ИДСФ) с заложенными в него алгоритмами идентификации СФ НДО (рис. 4). УИПА в процессе функционирования НДО измеряет на его входе значения параметров автоколебаний T_{on}, T_{off}, на выходе — значения

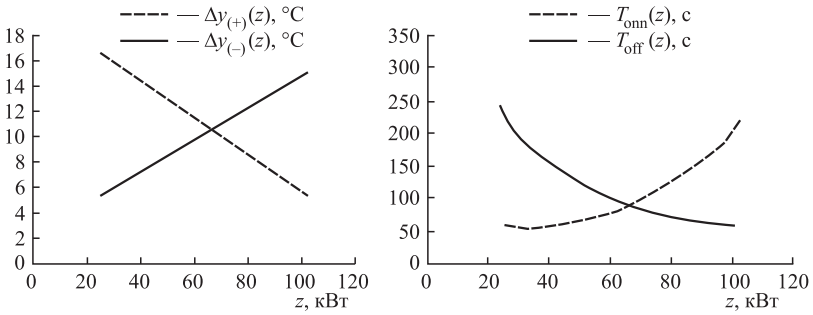


Рис. 3. Изменение параметров автоколебаний температуры в зоне нагрева аппарата сепарации в зависимости от потребляемого зоной нагрева тепла на испарение из титановой губки примесей магния и хлорида магния:
а — $\Delta y_{(+)}(z)$, $\Delta y_{(-)}(z)$; *б* — $T_{\text{on}}(z)$, $T_{\text{off}}(z)$

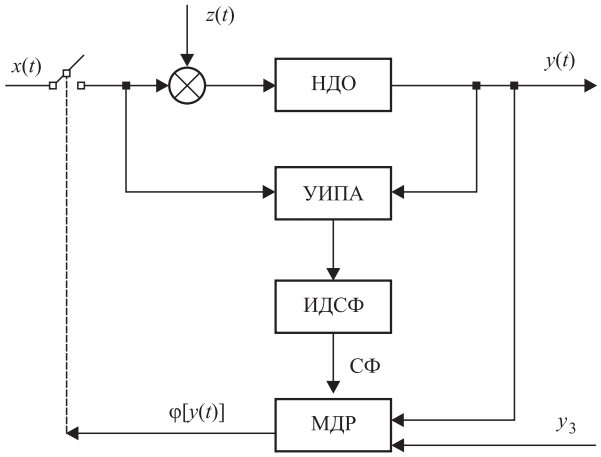


Рис. 4. Структурная схема системы идентификации СФ НДО

параметров автоколебаний $\Delta y_{(+)}$, $\Delta y_{(-)}$. ИДСФ использует результаты измерений параметров автоколебаний и определяет текущие СФ НДО.

В современных автоматизированных системах управления функции МДР, УИПА и ИДСФ выполняют микропроцессорные контроллеры [3].

Заключение. Рассмотрен метод идентификации СФ по автоколебательным режимам СМДР НДО. В результате параметрической идентификации модели НДО установлены функциональные зависимости изменения параметров автоколебаний в СМДР и действующего на НДО возмущения. Указанные зависимости используются для математического описания и идентификации СФ НДО в СМДР.

Предложенный метод нашёл практическое применение в производстве губчатого титана для идентификации СФ процессов восстановления и вакуумной сепарации в системах ситуационного управления [7].

Данный метод может быть рекомендован для разработки систем идентификации СФ неопределённых динамических объектов в различных отраслях промышленности.

Библиографические ссылки

1. **Сергин М.Ю.** Современное состояние и возможные пути решения проблем построения систем управления технологическими процессами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 1. С. 2—8.

2. **Кирин Ю.П.** Позиционное управление технологическими процессами в условиях неопределенности // Известия Южного федерального ун-та. Технические науки. 2009. № 2. С. 158—160.

3. **Краев С.Л., Кирин Ю.П.** Идентификация ситуаций функционирования технологических процессов в программируемых логических контроллерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 7. С. 136—139.

4. **Кирин Ю.П., Черепанов А.И., Протасов Ю.А.** и др. Минимизация длительности процессов сепарации титана в АСУТП // Цветные металлы. 1983. № 1. С. 51—54.

5. **Кирин Ю.П., Тихонов В.А.** Методы параметрической идентификации моделей неопределенных динамических объектов в системах двухпозиционного регулирования. Ч. 1 // Вестник Казанского технологического ун-та. 2017. Т. 20. № 13. С. 88—92.

6. **Кирин Ю.П., Затонский А.В., Беккер В.Ф.** и др. Синтез и анализ оптимального позиционного управления технологическими процессами производства губчатого титана // Автоматизация и современные технологии. 2010. № 9. С. 18—21.

7. **Кирин Ю.П., Краев С.Л.** Ситуационное управление процессами производства губчатого титана // Промышленные АСУ и контроллеры. 2011. № 11. С. 6—11.

Ссылка для цитирования

Кирин Ю.П., Тихонов В.А. Идентификация ситуаций функционирования неопределённых динамических объектов в системах двухпозиционного регулирования // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 277—281.

Уважаемые читатели!

Редакция предлагает руководителям организаций, ищущих новые рынки для реализации своей продукции, услуги по размещению рекламы и объявлений. Цены за публикацию умеренные.

УДК 629.7

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

ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ ПРИБОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрены теоретические основы одного из способов поиска мест неисправностей в системах, целевое назначение которых может быть представлено с достаточной для практики достоверностью как некоторая функциональная зависимость между входами, выходами и параметрами элементов (блоков, узлов), изменяющимися постепенно либо скачкообразно.

Ключевые слова: диагностика неисправностей; система; оборудование; способ; вход; выход; параметры; элементы.

The theoretical foundations of one search way for fault locations in systems whose purpose can be presented with confidence sufficient for practice as some functional relationship between inputs, outputs and parameters of its elements (blocks, nodes), changing gradually or intermittently, are considered.

Keywords: fault diagnosing; system; equipment; method; input; output; parameters; elements.

Непрерывное совершенствование различных сложных электроавтоматических, радиотехнических и других систем, входящих в состав приборного оборудования промышленного и оборонного назначения, приводит к усложнению эксплуатации последнего и повышению трудозатрат на его техническое обслуживание. Это объясняется, в частности, тем, что в процессе эксплуатации оборудования по целому ряду причин в нём неизбежно возникают неисправности. На обнаружение последних, как правило, тратится время, в несколько раз превышающее суммарное время безотказной работы оборудования, и время на их устранение. При этом установлением причин появления неисправностей и поиском их мест вынуждены заниматься специалисты высокой квалификации. Поэтому проблема автоматизации процессов диагностики в сложных системах приборного оборудования приобретает всё более важное значение. Этой проблемой уже более полувека занимаются как у нас в стране, так и за рубежом [1—11].

Однако большинство из описанных в литературе способов поиска неисправностей либо требуют наличия на объекте контроля значительного количества первичных датчиков и контролируемых выходов и могут быть реализованы лишь с помощью достаточно сложных алгоритмов, либо обладают низкой достоверностью результатов поиска из-за ограниченности исходных предпосылок при решении задачи диагностики.

В том случае, когда целевое назначение оборудования может быть представлено с достаточной для практики точностью как некоторая функциональная зависимость между входами, выходами и внутренними параметрами его элементов (блоков, узлов), изменяющимися постепенно либо скачкообразно, основные недостатки известных способов могут быть устранены применением описанного ниже способа.

Согласно этому способу, диагностика неисправностей оборудования начинается с анализа его выходов, относящихся как к оборудованию в целом, так и к его отдельным блокам и узлам. При этом в первую очередь рассматриваются выходные параметры, характеризующие целевое назначение аппаратуры, и выходы, функционально охватывающие наибольшее число внутренних параметров. Например, для счётно-решающего устройства это будут выходные величины, представляющие конечный результат решения, для системы автоматического регулирования — её переходная характеристика, определяемая, например, величиной интеграла

$$J = \int_0^t \left(X_{\text{вых}} + k \frac{dX_{\text{вых}}}{dt} \right)^2 dt.$$

Для электродвигателя такими параметрами будут его мощность и пусковая характеристика и т. д.

Число выходов (выходных функций U) не лимитируется. Однако для упрощения выкладок ниже рассматривается оборудование лишь с одним выходом, имеющее s входов (входных параметров Q_μ (μ = 1, 2, ..., s) и t ($t = r_1, r_2, ..., r_t$) внутренних параметров, коэффициенты влияния которых на выходную функцию хотя бы в одном из j наборов (j = 1, 2, ..., n) удовлетворяют неравенству $a_{ji} \geqslant a_o$ (a_o — заданная величина порога; i = 1, 2, ..., t). При этом предполагается, что внутренние параметры не зависят как друг от друга, так и от изменения входных параметров, определяемых матрицей

$$\left\| \begin{matrix} Q_{11} & Q_{12} & \cdots & Q_{1\mu} & \cdots & Q_{1s} \\ Q_{21} & Q_{22} & \cdots & Q_{2\mu} & \cdots & Q_{2s} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{j1} & Q_{j2} & \cdots & Q_{j\mu} & \cdots & Q_{js} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Q_{n1} & Q_{n2} & \cdots & Q_{n\mu} & \cdots & Q_{ns} \end{matrix} \right\|, \qquad (1)$$

в которой каждая строка совокупности Q_{j1}, Q_{j2}, ..., Q_{js} интерпретируется как точка s-мерного пространства. Каждой такой точке соответствует выходная величина U_j, а всей матрице (1) — вектор выходной функции $\bar{U} = \bar{U}(U_1, U_2, \ldots, U_j, \ldots, U_n)$, дискретные реализации которого являются основной исходной информацией. На основании этой информации делается заключение о техническом состоянии проверяемого оборудования и при необходимости (если оборудование оказалось неисправным) — определяется место неисправности или её причина.

Связь между значениями U_j, $Q_{j\mu}$ и внутренними параметрами r_t оборудования может быть выражена зависимостью

$$U_j = f(Q_{j1}, Q_{j2}, \ldots, Q_{js}, r_1, r_2, \ldots, r_t). \qquad (2)$$

Выходная ошибка оборудования на некотором j-м наборе значений его входных параметров (воздействий) определяется выражением

$$\Delta_j = U_j - U_{oj}, \qquad (3)$$

где U_{oj} — номинальное значение выходной функции на j-м наборе значений входных воздействий.

На основе зависимостей (2) и (3) можем записать

$$\Delta_j = \\ = \varphi(Q_{j1}, Q_{j2}, \ldots, Q_{js}; r_1, r_2, \ldots, r_m, r_{m+1}, \ldots, r_{m+k=t}), \qquad (4)$$

где r_1, r_2, .., r_m — внутренние параметры оборудования, которые могут принять в некотором диапазоне любое значение; r_{m+1}, r_{m+2}, ..., $r_{m+k=t}$ — параметры, значение которых изменяется скачкообразно.

Предполагается, что между параметрами первой группы и изменениями выходного сигнала существуют линейные соотношения

$$\Delta = \frac{\partial \Delta}{\partial r_1}\Delta r_1 + \frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\Delta r_2 + \ldots + \frac{\partial \Delta}{\partial r_m}\Delta r_m, \qquad (5)$$

где Δr_1, Δr_2, ..., Δr_m — ошибки параметров r_1, r_2, ..., r_m, отсчитываемые от их номинальных значений; $\frac{\partial \Delta}{\partial r_1}, \frac{\partial \Delta}{\partial r_2}, \ldots, \frac{\partial \Delta}{\partial r_m}$ — частные производные, определяемые при номинальных значениях параметров.

Поскольку каждое из s входных воздействий контролируемого оборудования может приобретать n дискретных значений в соответствии с матрицей (1), то можно утверждать, что получим n выходных ошибок Δ_1, Δ_2, ..., Δ_n, которые можно интерпретировать как вектор n-мерного пространства

$$\bar{\Delta} = \bar{\Delta}(\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_n). \qquad (6)$$

При этом производные от выходной ошибки по параметрам r_1, r_2, ..., r_m составят матрицу

$$\left\| \begin{matrix} \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_1}\right)_1 & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_1 & \cdots & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_m}\right)_1 \\ \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_1}\right)_2 & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_2 & \cdots & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_j & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_j & \cdots & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_j \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_n & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_n & \cdots & \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_n \end{matrix} \right\|. \qquad (7)$$

Приведём производные матрицы (7) к величинам одинаковой размерности. Для этого из n производных, относящихся к одному параметру, выберем наибольшую и примем её равной единице. Тогда любая другая производная может быть определена по формулам

$$a_{j1} = \frac{\left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_1}\right)_j}{\left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_1}\right)_{\max}}; \; a_{j2} = \frac{\left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_j}{\left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2}\right)_{\max}}; \ldots; \\ a_{jm} = \frac{\left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_m}\right)_j}{\left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_m}\right)_{\max}}. \qquad (8)$$

Чтобы записать уравнение (5) в новых соотношениях, введём следующие обозначения:

$$x_1 = \Delta r_1 \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_1} \right)_{\max}; x_2 = \Delta r_2 \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_2} \right)_{\max}; \ldots; \quad x_m = \Delta r_m \left(\frac{\partial \Delta}{\partial r_m} \right)_{\max}. \tag{9}$$

Тогда уравнение (5) примет вид

$$\Delta = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \ldots + a_m x_m. \tag{10}$$

При этом производным a_1, a_2, ..., a_m можно условно приписать размерность выходной ошибки, а ошибкам параметров x_1, x_2, ..., x_m — смысл безразмерных величин. В такой интерпретации уравнение (10) можно обобщить и с учётом формулы (6) представить его в виде векторного соотношения

$$\overline{\Delta} = \overline{a}_1 x_1 + \overline{a}_2 x_2 + \ldots + \overline{a}_m x_m, \tag{11}$$

где

$\overline{a}_1 = \overline{a}_1(a_{11}, a_{21}, \ldots, a_{j1}, \ldots, a_{n1})$;

$\overline{a}_2 = \overline{a}_2(a_{12}, a_{22}, \ldots, a_{j2}, \ldots, a_{n2})$;

...

$\overline{a}_m = \overline{a}_m(a_{1m}, a_{2m}, \ldots, a_{jm}, \ldots, a_{nm})$;

$|\overline{a}_1| = \sqrt{[a_1^2]}$; $|\overline{a}_2| = \sqrt{[a_2^2]}$; ...; $|\overline{a}_m| = \sqrt{[a_m^2]}$.

Здесь приняты гауссовские обозначения

$$[a_1^2] = \sum_{j=1}^{n} a_{j1}^2; \; [a_2^2] = \sum_{j=1}^{n} a_{j2}^2, \ldots, [a_m^2] = \sum_{j=1}^{n} a_{jm}^2.$$

Векторное уравнение (11) может быть развёрнуто в виде системы линейных уравнений

$$\begin{aligned} &a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1m}x_m = \Delta_1; \\ &a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2m}x_m = \Delta_2; \\ &\ldots \\ &a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \ldots + a_{jm}x_m = \Delta_j; \\ &\ldots \\ &a_{n1}x_1 + a_{n2}x_2 + \ldots + a_{nm}x_m = \Delta_n. \end{aligned} \tag{12}$$

Если к системе уравнений (12) предъявить дополнительные требования

$$[\Delta^2] = \min \text{ при } n \geqslant m, \tag{13}$$

то она может иметь единственное решение. При этом система уравнений (12) приводится к нормализованному виду

$$\begin{aligned} &[a_1^2]x_1 + [a_1 a_2]x_2 + \cdots + [a_1 a_m]x_m = [a_1 \Delta]; \\ &[a_1 a_2]x_1 + [a_2^2]x_2 + \cdots + [a_2 a_m]x_m = [a_2 \Delta]; \\ &\ldots \\ &[a_1 a_m]x_1 + [a_2 a_m]x_2 + \cdots + [a_m^2]x_m = [a_m \Delta]. \end{aligned} \tag{14}$$

Входящие в состав системы уравнений (14) производные могут быть определены теоретическим либо экспериментальным путём. В первом случае в соответствии с формулами (2) или (4) строится математическая модель связи выходной функции или выходной ошибки с внутренними и входными параметрами проверяемого оборудования. На основе указанной модели составляется программа, по которой производные вычисляются на компьютере.

Во втором случае производные получаются как небольшие приращения выходной функции при изменении параметров r_1, r_2, ..., r_m на заведомо исправном оборудовании или аналоговой модели, имитирующей его нормальное (расчётное) функционирование. Значение выходной функции измеряется до и после изменения каждого параметра. Разности измеренных значений сводят в матрицу (7) и затем обрабатывают по формулам (8).

При наличии матрицы относительных производных, вычисленных по формулам (8), определение неисправностей, явившихся следствием отклонения параметров r_1, r_2, ..., r_m от их номинальных значений, сводится к решению системы уравнений (14).

Однако для сложных систем приборного оборудования указанный путь поиска неисправностей из-за значительного количества вычислительных операций может оказаться неприемлемым ни по времени поиска, ни по достоверности его результатов. Для таких систем более целесообразным представляется поиск не всех параметров, явившихся причиной неисправности, а лишь того из них, который в наибольшей степени обусловил её появление. В векторном представлении это означает, что требуется найти такой вектор производной, который бы составлял наименьший угол с вектором выходной ошибки. Для параметров r_{m+1}, r_{m+2}, ..., $r_{m+k=t}$, относящихся к подгруппе внутренних параметров, изменяющихся скачкообразно и характеризуемых приращениями δ_{m+1}, δ_{m+2}, ..., δ_t, требуется найти такой вектор приращений, который наименьшим образом отличался бы от вектора выходной ошибки.

Указанные условия можно выразить иначе: требуется найти такой постепенно изменяющийся параметр, вариация которого больше всего уменьшала бы выходные ошибки проверяемого оборудования. Для параметров, изменяющихся скачкообразно, необходимо вычитать приращения выходной функции из выходной ошибки. Тот параметр, который при этом наиболее существенным образом уменьшит

выходные ошибки, будем считать параметром, обусловившим неисправность. Это условие можно представить следующим образом.

Вместо системы уравнений выходных ошибок (12) составим следующие соотношения, каждое из которых будет относиться лишь к одному параметру:

$$\begin{aligned}
&a_{11}x_1 = \Delta_1,\ a_{12}x_2 = \Delta_1,\ \dots,\ a_{1m}x_m = \Delta_1;\\
&a_{21}x_1 = \Delta_2,\ a_{22}x_2 = \Delta_2,\ \dots,\ a_{2m}x_m = \Delta_2;\\
&\dots\\
&a_{j1}x_1 = \Delta_j,\ a_{j2}x_2 = \Delta_j,\ \dots,\ a_{jm}x_m = \Delta_j;\\
&\dots\\
&a_{n1}x_1 = \Delta_n a_{n2},\ x_2 = \Delta_n,\ \dots,\ a_{nm}x_m = \Delta_n.
\end{aligned} \tag{15}$$

Применив к этим соотношениям дополнительные требования (13), получим

$$[a_1^2]x_1 = [a_1\Delta];\ [a_2^2]x_2 = [a_2\Delta];\ \dots;\ [a_m^2]x_m = [a_m\Delta].$$

Отсюда вытекает, что

$$x_1 = \frac{[a_1\Delta]}{[a_1^2]};\ x_2 = \frac{[a_2\Delta]}{[a_2^2]};\ \dots;\ x_m = \frac{[a_m\Delta]}{[a_m^2]}. \tag{16}$$

Найдя x_1, x_2, ..., x_m, определим величины выходных ошибок при условии, что каждая из ошибок x_1, x_2, ..., x_m устраняется. Рассмотрим процедуру устранения ошибок применительно к одному из параметров, например, к параметру с производной $\overline{a}_1$. При этом получим следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
&q_1 = \Delta_1 - a_{11}x_1 = \Delta_1 - a_{11}\frac{[a_1\Delta]}{[a_1^2]};\\
&q_2 = \Delta_2 - a_{21}x_1 = \Delta_2 - a_{21}\frac{[a_1\Delta]}{[a_1^2]};\\
&\dots\\
&q_j = \Delta_j - a_{j1}x_1 = \Delta_j - a_{j1}\frac{[a_1\Delta]}{[a_1^2]};\\
&\dots\\
&q_n = \Delta_n - a_{n1}x_1 = \Delta_n - a_{n1}\frac{[a_1\Delta]}{[a_1^2]},
\end{aligned} \tag{17}$$

где q_1, q_2, ..., q_j, ..., q_n — остаточные ошибки (уменьшенные погрешности) выходной функции на 1-м, 2-м, ..., j-м, ..., n-м наборах входных параметров (внешних воздействий).

В качестве оценочной величины уменьшения выходных ошибок примем сумму квадратов остаточных ошибок

$$[q^2]_1 = \sum_{j=1}^{n} q_j^2. \tag{18}$$

Учитывая соотношения (17), для первого набора внешних воздействий получим

$$\begin{aligned}
[q^2]_1 &= \Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \dots + \Delta_n^2 - 2\frac{[a_1\Delta]}{[a_1^2]}\times\\
&\times(a_{11}\Delta_1 + a_{21}\Delta_2 + \dots + a_{j1}\Delta_j + \dots + a_{n1}\Delta_n) +\\
&+\left\{\frac{[a_1\Delta]}{[a_1^2]}\right\}^2 (a_{11}^2 + a_{21}^2 + \dots + a_{j1}^2 + \dots + a_{n1}^2) =\\
&= [\Delta^2] - 2\frac{[a_1\Delta]}{[a_1^2]}[a_1\Delta] + \frac{[a_1\Delta]^2}{[a_1^2]^2}[a_1^2] = [\Delta^2] - \frac{[a_1\Delta]^2}{[a_1^2]}.
\end{aligned} \tag{19}$$

По аналогии для других наборов внешних воздействий можно записать

$$\begin{aligned}
&[q^2]_2 = [\Delta^2] - \frac{[a_2\Delta]^2}{[a_2^2]};\\
&\dots\\
&[q^2]_m = [\Delta^2] - \frac{[a_m\Delta]^2}{[a_m^2]}.
\end{aligned} \tag{20}$$

Для параметров, изменяющихся скачкообразно, может быть применена более простая оценка суммы квадратов уменьшенных погрешностей:

$$\begin{aligned}
&[q^2]_{m+1} = [(\Delta - \delta_1)^2] =\\
&= (\Delta_1 - \delta_{11})^2 + (\Delta_2 - \delta_{21})^2 + \dots + (\Delta_n - \delta_{n1})^2;\\
&[q^2]_{m+2} = [(\Delta - \delta_2)^2] =\\
&= (\Delta_1 - \delta_{12})^2 + (\Delta_2 - \delta_{22})^2 + \dots + (\Delta_n - \delta_{n1})^2;\\
&\dots\\
&[q^2]_{m+k} = [(\Delta - \delta_k)^2] =\\
&= (\Delta_1 - \delta_{1k})^2 + (\Delta_2 - \delta_{2k})^2 + \dots + (\Delta_n - \delta_{nk})^2
\end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
&\sum_{j=1}^{n} q_{j,m+1}^2 = \sum_{j=1}^{n} (\Delta_j - \delta_{j1})^2;\\
&\sum_{j=1}^{n} q_{j,m+2}^2 = \sum_{j=1}^{n} (\Delta_j - \delta_{j1})^2;\\
&\dots\\
&\sum_{j=1}^{n} q_{j,m+k}^2 = \sum_{j=1}^{n} (\Delta_j - \delta_{jk})^2.
\end{aligned} \tag{21}$$

Для упрощения алгоритма диагностики и сокращения времени поиска неисправностей входящие в уравнения (19) и (20) производные целесообразно нормализовать. Нормализацию можно проделать предварительно с помощью компьютера по формуле

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{(a_{1i}^2 + a_{2i}^2 + \ldots + a_{ji}^2 + \ldots + a_{ni}^2)}}, \quad (22)$$

где b_{ij} — нормированное значение относительной производной по i-му внутреннему параметру на j-м наборе входных параметров (для параметров, изменяющихся постепенно, $i = 1, 2, ..., m$).

С учётом формулы (22) системы уравнений (19) и (20) могут быть представлены в виде

$$[q^2]_1 = [\Delta^2] - [b_1\Delta]^2;$$
$$[q^2]_2 = [\Delta^2] - [b_2\Delta]^2;$$
$$\ldots$$
$$[q^2]_m = [\Delta^2] - [b_m\Delta]^2$$

или

$$\sum_{j=1}^{n} q_{j1}^2 = \sum_{j=1}^{n} \Delta_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} b_{j1}\Delta_j\right)^2;$$
$$\sum_{j=1}^{n} q_{j2}^2 = \sum_{j=1}^{n} \Delta_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} b_{j2}\Delta_j\right)^2; \quad (23)$$
$$\ldots$$
$$\sum_{j=1}^{n} q_{jm}^2 = \sum_{j=1}^{n} \Delta_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} b_{jm}\Delta_j\right)^2.$$

Для реализации зависимостей (21) и (23) в «память» компьютера или специализированного вычислительного устройства, обеспечивающего диагностику неисправностей проверяемого оборудования, кроме матрицы (1) должны быть записаны вектор номинальных значений выходной функции

$$\bar{U}_{\text{о}} = \bar{U}_{\text{о}}(U_{\text{о}1}, U_{\text{о}2}, \ldots, U_{\text{о}j}, \ldots, U_{\text{о}n}), \quad (24)$$

матрица нормированных значений относительных производных, определяемых по формуле (22),

$$\begin{Vmatrix} b_{11} & b_{12} & \ldots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \ldots & b_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{j1} & b_{j2} & \ldots & b_{jm} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \ldots & b_{nm} \end{Vmatrix} \quad (25)$$

и матрица приращений выходной функции для внутренних параметров, изменяющихся скачкообразно,

$$\begin{Vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \ldots & \delta_{1k} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \ldots & \delta_{2k} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{j1} & \delta_{j2} & \ldots & \delta_{jk} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \ldots & \delta_{nk} \end{Vmatrix}. \quad (26)$$

При наличии исходной информации, определяемой зависимостью (24), матрицами (1), (25) и (26), весь процесс установления технического состояния и диагностики неисправностей приборного оборудования сводится к следующей последовательности операций:

1. Измеряются n значений выходной функции U_1, U_2, ..., U_n и по формуле (3) определяются величины выходных ошибок проверяемого оборудования.

2. Определяется сумма квадратов $\sum_{j=1}^{n} \Delta_j^2$ и проверяется соотношение

$$\sum_{j=1}^{n} \Delta_j^2 \leqslant D, \quad (27)$$

где D — допустимое значение суммы квадратов ошибок выходной функции проверяемого оборудования.

Если величина $\sum_{j=1}^{n} \Delta_j^2$ удовлетворяет соотношению (27), то проверяемое оборудование считается исправным. В противном случае осуществляется переход к п. 3.

3. По формулам (21) и (23) определяются уменьшенные погрешности вектора выходной функции и из всех t внутренних параметров (m — непрерывных и k — изменяющихся скачкообразно) выбирается тот, который обусловил наименьшую сумму квадратов уменьшенной погрешности. Этот параметр и является искомым, определяющим основную неисправность проверяемого оборудования.

4. Если окажется, что

$$\sum_{j=1}^{n} (\Delta_j - \delta_j)^2 = \sum_{j=1}^{n} \Delta_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} b_j\Delta_j\right)^2,$$

то причина неисправности приписывается тому параметру, у которого больше вероятность выхода из нормы.

Существующая на практике ограниченность линейной связи между параметрами r_1, r_2, ..., r_m и выходной функцией U может привести к тому, что результат вычислений уменьшенных значений суммы квадратов выходных ошибок по формулам (23) по мере увеличения рассогласований параметров будет всё более искажаться и, наконец, наступит момент,

когда получим ошибочный минимум величины $\sum_{j=1}^{n} q_{ji}^2$, который уже не будет относиться к параметру, определяющему основную неисправность системы. В этом случае в процессе определения производных, задаваясь приращениями параметров, требуется установить, при каком их рассогласовании наступает ложный минимум, т. е. когда становятся минимальными две суммы квадратов уменьшенных погрешностей: одна истинная, соответствующая параметру с рассогласованием, другая ложная для какого-либо параметра за счёт нелинейных искажений. Полученную границу сходимости параметра целесообразно несколько уменьшить (например, умножив на коэффициент 0,8...0,9), чтобы полученный таким образом запас дал некоторую гарантию и обеспечил лучшую различимость параметра, вызвавшего неисправность, при вариации других параметров и наличии случайных ошибок, которые могут быть в реальных случаях.

Применяя указанный подход, можно определить интервал изменения параметра (интервал сходимости), в котором линейное решение задачи будет действительным. Интервал сходимости можно расширить, применив линейное разложение выходной функции относительно нового интервала, примыкающего к старому (предыдущему) интервалу. При этом новое разложение, характеризуемое новой производной и приращением c_i выходной функции относительно точки нового разложения, целесообразно рассматривать как некоторый новый параметр. В этом случае формулы для вычисления уменьшенного значения квадрата погрешностей будут иметь вид

$$\begin{aligned}
&\sum_{j=1}^{n} q_{j1}^2 = \sum_{j=1}^{n} (\Delta_j - c_{j1})^2 - \left[\sum_{j=1}^{n} \tilde{i}_j (\Delta_j - c_{j1})\right]^2;\\
&\sum_{j=1}^{n} q_{j2}^2 = \sum_{j=1}^{n} (\Delta_j - c_{j2})^2 - \left[\sum_{j=1}^{n} \tilde{i}_j (\Delta_j - c_{j2})\right]^2; \qquad (28)\\
&\ldots\\
&\sum_{j=1}^{n} q_{ji}^2 = \sum_{j=1}^{n} (\Delta_j - c_{ji})^2 - \left[\sum_{j=1}^{n} \tilde{i}_j (\Delta_j - c_{ji})\right]^2,
\end{aligned}$$

где $\tilde{i}_j = \dfrac{i_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^{n} i_j^2}}$.

Остальные величины, входящие в формулы (28), соответствуют смыслу величин, входящих в формулы (21) и (23).

Таким образом, для одного и того же параметра будут вычислены два уменьшенных значения суммы квадратов погрешностей выходной функции для старого и нового интервалов. То из них, которое окажется наименьшим, и будет определять причину неисправности, характеризуя одновременно интервал, которому соответствует рассогласование параметра. Указанный приём можно распространить на любое число интервалов.

Выводы. Рассмотренный способ поиска мест неисправностей целесообразно использовать в случае, если целевое назначение подлежащего диагностике оборудования может быть представлено с достаточной для практики точностью как некоторая функциональная зависимость между её входами, выходами и параметрами элементов (блоков, узлов), изменяющимися постепенно либо скачкообразно. Использование данного способа в этом случае позволяет на объекте контроля и диагностики значительно сократить количество первичных преобразователей и контролируемых выходов, а также повысить достоверность результатов технической диагностики оборудования.

Библиографические ссылки

1. **Johnson R.A.**, **Kletsky E.J.** Diagnosis of equipment failures // IRE. Trans. 1960. PRQC-9. No. 1. P. 23—34.

2. **Kletsky E.J.** An application of the information theory approach to failure diagnosis // IRE. Trans. 1960. PRQC-9. No. 3. P. 29.

3. **Goller J., Karl K.** Die Optimierung der Fehlersuche an elektronischen Einrichtungen mit Hilfe der Jnformationstheorie // Nachrichtentechnik. 1965. Vol. 15. No. 12. P. 455—461.

4. **Карибский В.В., Пархоменко П.П., Согомонян Е.С.** Вопросы контроля работоспособности и поиска неисправностей в конечных автоматах // Доклады АН СССР. 1965. Вып. 161. № 1. С. 59—62.

5. **Киншт Н.В.** Об одной процедуре поиска неисправностей // Автометрия. 1965. № 3. С. 34—38.

6. **Гайский В.А.** Метод построения восстанавливаемой системы управления с автоматической диагностикой неисправностей // Автоматика и телемеханика. 1965. Вып. 26. № 8. С. 1451—1461.

7. **Дорогов А.Е., Авдеев Н.К., Шибанов Г.П.** Способ поиска мест неисправности систем // Авт. свид-во СССР № 181394. 1966. Бюл. № 9.

8. **Шибанов Г.П.** Распознавание в системах автоконтроля. М.: Машиностроение, 1973. 428 с.

9. **Шибанов Г.П.** Оценка эффективности автоматизации процессов контроля оборудования // Сб. «Основные вопросы теории и практики надёжности». М.: Советское радио, 1975. С. 336—342.

10. **Контроль** функционирования больших систем / Под ред. Г.П. Шибанова. М.: Машиностроение, 1977. 360 с.

11. **Шибанов Г.П.** Оптимизация процессов контроля бортовых комплексов оборудования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 6. С. 56—61.

Ссылка для цитирования

Шибанов Г.П. Диагностика неисправностей приборного оборудования // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 6. С. 282—287.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Алгоритм управления гибридной моторно-трансмиссионной установкой быстроходной гусеничной машины с механической трансмиссией. *Вестник машиностроения.* 2019. № 2.

Исследованы свойства гибридной силовой установки с механической трансмиссией, жёстко соединяющей ДВС с ведущими колёсами, в которой крутящий момент, создаваемый параллельным электрическим полем, суммируется с крутящим моментом ДВС при перегрузке последнего. Получены алгоритмы управления потоком электрической мощности, не допускающие противодействие потоку механической мощности при любых условиях.

Компьютерное моделирование штамповки длинномерной листовой заготовки элемента шарового резервуара. *Вестник машиностроения.* 2019. № 2.

Получена компьютерная модель процесса последовательной холодной штамповки длинномерной листовой заготовки для изготовления оболочки шарового резервуара объёмом 2000 м^3. Показаны зоны пластической деформации, которые обеспечивают требуемую форму лепестка. Определены усилия деформирования листовой заготовки по заданному маршруту.

Исследование гибки тонкостенных труб с узкозональным градиентным нагревом. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2019. Т. 17. № 2.

Предложена конечно-элементная модель гибки тонкостенных труб с узкозональным индукционным нагревом, выполненная в среде ANSYS и позволяющая определять утонение стенки в зависимости от радиуса гиба, свойств материала и распределения температуры нагрева по сечению трубы. Основными особенностями представленной модели являются параметризация и высокая скорость расчёта в результате моделирования деформирования материала только в зоне нагрева.

Влияние давления при горячем изостатическом прессовании на свойства гранулируемого жаропрочного никелевого сплава. *Заготовительные производства в машиностроении.* 2019. Т. 17. № 2.

Рассмотрено развитие подходов к компактированию жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинного двигателя. Проведено сравнение зарубежного и отечественного опыта. Исследованы структура и механические свойства материала после горячего изостатического прессования (ГИП) при различном уровне давления. Показано, что давление при ГИП необходимо выбирать, основываясь не только на получении беспористого материала, но и для обеспечения требуемой структуры и механических свойств.

Информационно-физический механизм ультрагидроструйной диагностики качества функциональных покрытий. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2019. Т. 15. № 2.

Рассмотрен механизм гидроструйной эрозии функциональных покрытий с позиций его информационно-диагностической значимости. Предложена вероятностная модель процесса гидроэрозии, отличительная черта которой состоит в возможности анализа поверхностного и объёмного ультраструйного накопления повреждённостей. Прямыми экспериментами доказана взаимосвязанность между этими механизмами формирования повреждений, что обосновывает научно-прикладную результативность аппарата ультрагидроструйной диагностики эксплуатационного качества различных функциональных покрытий.

Оценка эффективности технологий упрочнения бандажей колёсных пар локомотивов по результатам эксплуатационных испытаний. *Упрочняющие технологии и покрытия.* 2019. Т. 15. № 2.

Представлены результаты исследования повышения износостойкости гребней колёсных пар локомотивов магнитоплазменной обработкой и ультразвуковым поверхностно-пластическим деформированием. Анализ упрочняющих технологий сделан по данным эксплуатационных испытаний на кольцевых маршрутах Забайкальской железной дороги.

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

Сдано в набор 26.03.2019.
Подписано в печать 23.05.2019.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

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

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