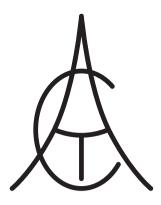


ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Главный редактор	Издаётся с 1947 г.
Микрин Е.А. – д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва	g
РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: Афанасьев В.Н. — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ	Tom 72 $\frac{3}{100}$
Ван Мэйлин — д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР)	$\frac{72}{2018}$
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ) — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик, Великобритания)	
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа) — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)	СОДЕРЖАНИЕ
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ — д.т.н., проф., МГУПИ	A DECIMATION HAS HAVING HOOFF FOR ATTEN OWAY
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана — д.фм.н., ИРЭ РАН	АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
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	Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-М:
Путилов В.Н. — ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"» (заместитель	моделирование типовых конструкций блоков электроники на механические воздействия
главного редактора) Румянцева О.Н. – генеральный директор ООО «Изд-во "Инновационное машиностроение"»	Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В. Интеллектуальное управление гибридной технологией,
Ся Юаньцин — д.т.н., проф., Пекинский политехн. ун-т (КНР) Фу Ли — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)	включающей 3D-печать и механическую обработку на станках с ЧПУ в условиях цифровых производств
Фёдоров И.Б. – д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана	Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С. Увеличение жизненного цикла изделий при обработке деталей динами-
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР) Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН,	ческими методами поверхностного пластического деформирования
МГТУ им. Н.Э. Баумана Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.	Дьяконов А.А., Городкова А.Е., Шульгин А.Н. Зависимость качественных и количественных показателей обработки от-
центр им. В.П. Чкалова Янович Е.А. – д.э.н., проф., Кошалинский политехн. ин-т (Польша)	верстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита от схемы заточки режущего инструмента 409
Редакторы — Мымрина И.Н., Селихова Е.А. Компьютерная вёрстка — Конова Е.В.	СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
Адрес редакции: 107076, Москва, Колодезный пер., д. 2a, стр. 2. Тел.: 8 (499) 268-41-77.	Обычайко Д.С., Шихин В.А. Методика формализации киберфизических систем в задачах анализа надёжности 414
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru; http://www.mashin.ru	Мышляев Ю.И., Нгуен Ти Тхань, Финошин А.В. Непрямое адаптивное управление каскадными системами с интегральным виртуальным алгоритмом
Учредитель:	
ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО "ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»	СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ
Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г. (ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК при Минобрнауки России изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Россий-	Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов



Russian index scientific citation (RINC)

Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Chief in Editor		It is published since 1947	
Mikrin E.A.	- dr.en.s., prof., academician of the RAS.	Q	
EDITORIAL COU	RSC «Energy» behalf of S.P. Korolev	\\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	
Afanasyev V.N.	- dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE	Volume /2	_
Wang Meiling	 Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China 	Volume 72 $\frac{9}{2018}$	}
Ivanov A.P.	- dr.ec.s., prof., MSURE (MIIT)	2010	•
Clark R.	– Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK		
Krioni N.K.	- dr.en.s., prof., USATU, Ufa	CONTENTS	
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	AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH	
Neusypin K.A.	dr.en.s., prof., MSTU behalf of N.E. Bauman	AND PRODUCTION PROCESSES	
Nefedov E.I.	- dr.phm.s., IRE RAS		
Nikiforov V.M.	- dr.en.s., prof., FSUE «NPCAP	Shalumov A.S., Pershin E.O., Shalumov M.A. ASONIKA	7-W.
Proletarskiy A.V.	behalf of N.A. Pilyugin» - dr.en.s., prof., MSTU behalf	Modeling of the electronics units typical designs on mechan	nical
Putilov V.N.	of N.E. Bauman - LLC «Publishing "Innovative machine	impact	387
Rumyantseva O.N.	building"» (deputy chief editor) . – General Director of LLC «Publishing	Kabaldin Yu.G., Kolchin P.V., Shatagin D.A., Kiselev A.V. Ir	
	"Innovative mashine building"»	ligent control of hybrid technology, including 3D printing and	
Xia Yuantsin	 Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology, P.R. China 	chining on CNC machines in conditions of digital production .	397
Fu Li	- Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China	Tamarkin M.A., Tishchenko E.E., Shvedova A.S. Increas	e in
Fedorov I.B.	 dr.en.s., prof., academician RAS, President of MSTU behalf of N.E. Bauman 	the life cycle of products when processing parts by dynamic	me-
He Yung	 Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science and Technology, P.R. China 	thods of surface plastic deformation	403
Shakhnov V.A.	 dr.en.s., prof., corr. member of RAS, MSTU behalf of N.E. Bauman 	Dyakonov A.A., Gorodkova A.E., Shulgin A.N. Depende	
Shibanov G.P.	 dr.en.s., prof., State Flight Test Center behalf of V.P. Chkalov 	of qualitative and quantitative parameters of processing I on PCBs from foil-coated glass-cloth laminate from the grind	
Yanovich E.A.	 dr.ec.s., prof., Koszalin Polytechnic. Ins., Poland 	scheme of the cutting tool	409
Editors — Mymrin Computer layout –	a I.N., Selikhova E.A. – Konova E.V.	MODERN TECHNOLOGIES	
Editorial addr		Obychayko D.S., Shikhin V.A. Technique of formalization of	f cv-
	Kolodezny lane – 2a, build. 2	berphysical systems in reliability analysis problems	
Tel.: +7 (499) 268	3-41-//. hin.ru; astmashin@yandex.ru;		
http://www.mash		Myshlyaev Yu.I., Nguen Ti Tkhan, Finoshin A.V. Indirect ad	lan-
Founder:		tive control of cascade systems with integral virtual algorithm	
LLC «SCIENTIFIC	AND TECHNICAL PUBLISHING		
"INNOVATIVE MAG	CHINE BUILDING"»	SYSTEMS AND CONTROL DEVICES	
	gistered in the Roskomnadzor on May 29, 2014	OTOTEMO AND CONTINUE DEVICES	
	O2), it is included in the list of publications		
approved by the Russian Ministry o	Higher Attestation Commission (VAK) of the f education and science for publication of the for academic degrees and the system of the	Klychnikov V.V., Selezneva M.S., Heusypin K.A., Proletakiy A.V. Using the federal Kalman filter to correct aircraft navition systems	riga-



АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 621.396.6.019.3

А.С. Шалумов, д-р техн. наук, проф., **Е.О. Першин,** канд. техн. наук, **М.А. Шалумов,** канд. техн. наук (ООО «Научно-исследовательский институт «АСОНИКА»)

ALS140965@mail.ru

АСОНИКА-М: МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОНИКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассмотрены вопросы автоматизированного расчёта механических характеристик типовых конструкций блоков радиоэлектронных средств при воздействии гармонической и случайной вибраций, одиночных и многократных ударов, линейных ускорений: назначение, состав, описание подсистемы АСОНИКА-М, входящей в состав автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА), форма задания исходных данных, примеры расчётов.

Ключевые слова: радиотехническое устройство; моделирование; механические характеристики; гармоническая и случайная вибрации; одиночные и многократные удары; линейные ускорения.

The problems of the mechanical characteristics automated calculation of the units typical designs for radio-electronic equipment under the influence of harmonic and random vibrations, single and multiple impacts, linear accelerations are considered: the purpose, composition, description of the subsystem ASONIKA-M, part of the automated system for ensuring the reliability and quality of ASONIKA equipment, source data, examples of calculations.

Keywords: radio engineering device; modeling; mechanical characteristics; harmonic and random vibration; single and multiple strikes; linear acceleration.

Назначение АСОНИКА-М. Подсистема АСОНИКА-М, входящая в состав автоматизированной системы обеспечения надёжности и качества аппаратуры (АСОНИКА), предназначена для расчёта механических характеристик типовых конструкций блоков радиоэлектронных средств (РЭС) при воздействии гармонической и случайной вибраций, одиночных и многократных ударов, линейных ускорений [1—3]. С помощью встроенного графического интерфейса она позволяет вводить типовые конструкции РЭС средствами САD-системы. Этот интерфейс называется АСОНИКА-САD.

По сути АСОНИКА-М является составной частью АСОНИКА-М-3D. В подсистеме АСОНИКА-М быстро и просто создаются типовые конструкции путём выбора типовых элементов и ввода геометрических параметров для них, а затем эти конструкции импортируются в АСОНИКА-М-3D для дальнейшей подготовки к расчётам (задания материалов, физических параметров, механических воздействий, креплений, параметров конечно-элементного разбиения и генерации конечно-элементной сетки), расчёту и выводу результатов расчёта.

В качестве типовых предусмотрены следующие виды блоков: цилиндрический, кассетный, этажерочный, сложный этажерочный, сложный БРСУ, сложный БФКДУ, сложный БСК, сложный БСКЭ32.

После моделирования конструкций блоков данные могут передаваться для дальнейшего расчёта, например в АСОНИКА-ТМ для моделирования механических процессов в конструкциях первого уровня РЭС (печатных узлов, кассет и т. п.) или в АСОНИКА-УМ для управления данными с возможностью автоматической передачи информации между различными уровнями иерархии конструкции при моделировании «сверху вниз».

Создание типовых конструкций РЭС средствами САD-системы. Исходные данные для расчёта механических характеристик конструкций блоков подготавливают на основе технического задания на разработку изделия и эскизов сборочных чертежей.

При подготовке исходных данных пользователю нет необходимости использовать справочную литературу, так как физико-механические параметры элементов конструкции (плотность, коэффициент Пуассона, модуль упругости, ко-



Рис. 1. Окно АСОНИКА-САД

эффициент демпфирования и др.) занесены в базу данных системы ACOHИKA (после импорта конструкции в ACOHИKA-M-3D необходимые параметры подгружаются после выбора материала конструкции).

Для ввода типовой конструкции блока используют графический редактор АСОНИКА-САD (запускается ярлык из папки АСОНИКА), при открытии которого в начале работы выбирается необходимый тип блока для конструирования (рис. 1) — загрузится интерфейс ввода конструкции соответствующего блока. При создании конструкций блоков в графическом интерфейсе следует использовать толь-

ко геометрические параметры, так как при импорте конструкции в ACOHИKA-M-3D крепления, контрольные точки, физические параметры и данные о материале удалятся. Все недостающие данные нужно будет задать в ACOHИKA-M-3D.

Цилиндрический блок. Для графического ввода 3D-модели конструкции цилиндрического типа в АСОНИКА-САD выбирают нужный тип конструкции — цилиндрический блок. При сохранении проекта файл будет иметь расширение bl2.

Рассмотрим последовательность действий для графического ввода 3D-модели конструкции цилиндрического типа. Вначале вводятся размеры блока: высота и диаметр; задаются толщины его стенок. Далее вводятся платы: в примере, представленном на рис. 2, введено пять плат, задан зазор для всех

плат. Для каждой платы заданы следующие параметры: толщина, расстояния от основания блока до плат. Следующий этап — ввод креплений самих плат (шпилек). В примере введены шесть опор и радиус окружности, на которой они располагаются, диаметр опор. На рис. 2 представлен результат работы по созданию 3D-модели конструкции цилиндрического блока. Сохранённая 3D-модель готова для импортирования в АСОНИКА-М-3D.

Блок кассетного типа. Интерфейс ввода 3D-модели конструкции блока кассетного типа такой же, как и для ввода 3D-модели конструкции цилиндрического блока. В кас-

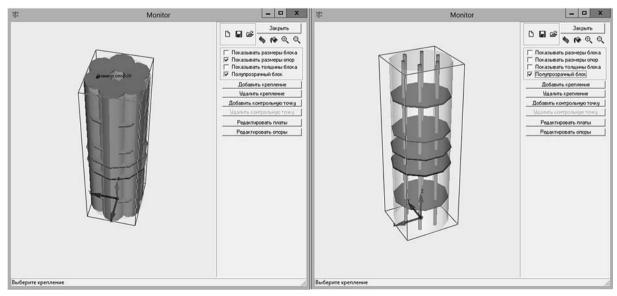


Рис. 2. Создание 3D-модели конструкции цилиндрического блока

сетном блоке платы не имеют опор и размещаются в направляющих, расположенных на дне и верхней стенке блока. В передней части блока платы вставлены в разъёмы, поэтому опоры здесь не нужны. В связи с этим все элементы интерфейса, связанные с опорами, в интерфейсе блока кассетного типа отсутствуют. При задании координат в пределах выбранной плоскости указываются расстояния от начала координат по двум осям (используется прямочгольная система координат).

Для ввода плат используется специальная панель, позволяющая задать число плат, имеется возможность выбора крепления по четырём сторонам, указываются ширина сечения направляющих, длина разъёма, толщина платы, её размещение в блоке (расстояние от начала координат), масса платы.

Для графического ввода 3D-модели конструкции в АСОНИКА-САD выбирают нужный тип конструкции — блок кассетный. Файл проекта будет иметь расширение bl3. Рассмотрим последовательность

действий для графического ввода конструкции кассетного типа. Вначале вводятся размеры блока: высота, ширина, длина; задаются толщины стенок блока. Далее вводятся платы. В примере, представленном на рис. 3, введено четыре платы. Задаются такие параметры, как ширина сечения направляющих, толщина платы, длина разъёма, расстояние от основания блока до платы. На рис. 3 представлен результат работы по созданию 3D-модели конструкции блока кассетного типа. Сохранённая 3D-модель готова для импортирования в АСОНИКА-М-3D.

Блок этажерочного типа. Интерфейс ввода 3D-модели конструкции блока этажерочного типа выглядит так же, как и интерфейсы для ввода 3D-моделей конструкций блоков цилиндрического и кассетного типов. В подсистеме АСОНИКА-САD выбирается нужный тип конструкции — блок этажерочный. Файл проекта получит расширение bl4.

Вначале вводятся размеры блока: высота, ширина, длина. Далее задаются толщины его стенок. На следующем этапе вводятся платы. Задают число плат. Параметры плат следующие: толщина платы, расстояние от основания блока до платы. В конце задаются опоры. Для этажерочных конструкций обычно используют четыре опоры. Для каждой из них

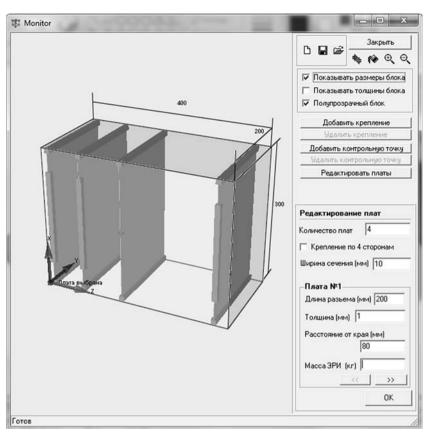


Рис. 3. 3D-модель конструкции блока кассетного типа

выбирается вариант установки, вводятся координаты и диаметр. Сохранённая 3D-модель конструкции готова для импортирования в АСОНИКА-М-3D.

Сложный этажерочный блок. Интерфейс ввода 3D-модели конструкции сложного этажерочного блока состоит из рабочей области, главного меню и панели управления. Панель управления состоит из визуальных параметров и команд управления. Визуальные компоненты интерфейса ввода интуитивно понятны. Перечислим некоторые из них: добавление, удаление, изменение контрольной точки; редактирование креплений; редактирование лапок крепления; редактирование внутренних блоков; редактирование рёбер жёсткости; редактирование этажерок.

Для графического ввода 3D-модели конструкции сложного этажерочного блока в АСОНИКА-САD выбирают нужный тип конструкции — блок сложный этажерочный. Сохранённый файл проекта будет иметь расширение bl5.

С помощью панели управления задают размеры блока: длину, ширину и высоту, определяют толщину стенок блока. На следующем этапе добавляют к блоку две лапки с параметрами: толщина, координаты, длина и ширина.

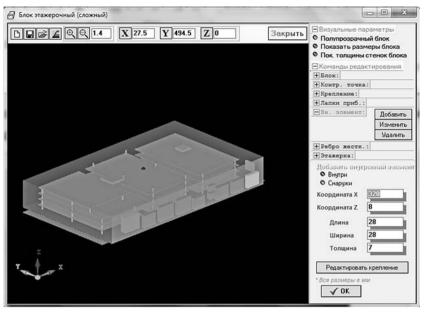


Рис. 4. 3D-модель конструкции сложного этажерочного блока

Далее вводят этажерки блока. В примере, представленном на рис. 4, введено три этажерки, в каждой по четыре платы. Для каждой этажерки задают следующие параметры: смещение по X, смещение по Y, режим прохождения шпилек, число плат. Для каждой платы вводятся расстояние по X, расстояние по Y, размер по X, размер по Y, расстояние от основания корпуса блока, толщина, диаметр шпилек, число шпилек. Параметры шпилек для каждой платы: расстояние по X, расстояние по Y, идёт до этажа (номер этажа). Далее вводятся координаты для всех шести креплений. Аналогично вводятся оставшиеся платы первой этажерки, а также все остальные этажерки с находящимися в них платами.

Затем задаются внутренние элементы. Выделяется верхняя крышка блока, и задаются координаты внутреннего элемента: координата по X, координата по Y, длина, ширина, толщина.

Можно также в режиме «Прозрачный блок» выделить какую-либо стенку блока или какуюлибо плату одной из трёх этажерок и разместить на них элемент с любыми параметрами. В примере, представленном на рис. 4, были установлены элементы на четвёртую плату этажерки № 3, добавлен элемент на заднюю боковую стенку блока, добавлено 10 элементов на боковую стенку блока. Результат — 3D-модель конструкции сложного этажерочного блока можно увидеть на рис. 4. Сохранённая 3D-модель готова для импортирования в АСОНИКА-М-3D.

Блок сложный ЭБПУ. Для загрузки интерфейса ввода 3D-модели конструкции блока сложный ЭБПУ в АСОНИКА-САD выбирают

тип конструкции — блок сложный ЭБПУ. Этот блок имеет следующие объекты.

Основание — центральный элемент конструкции. Оно представляет собой пластину с симметричным уменьшением толщины к середине. Для основания задаются габариты, которые частично определяют габариты блока. В дополнение к этому для основания задаются размеры уменьшения и толщина лапок.

Стенки корпуса, крышка, верхний и нижний бурты — в модели представлены как отдельные объекты, имеющие свои панели ввода параметров.

ко в окне модели, при этом можно задать его положение относительно стенки, которой принадлежит лапка.

Кронштейн — конструктивно представляет собой единое целое, выполнен из одного материала и в модели условно разбит на геометрические фигуры, параметры которых и задаются в интерфейсе.

Модель кронштейна блока ЭБПУ приведена на рис. 5. Кронштейн крепится к основанию блока с помощью лапок и является крепежом для плат. Дерево объектов кронштейна включает следующие объекты: крестовину,

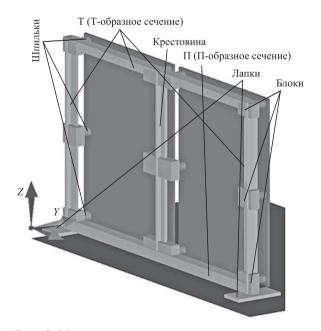


Рис. 5. Модель кронштейна

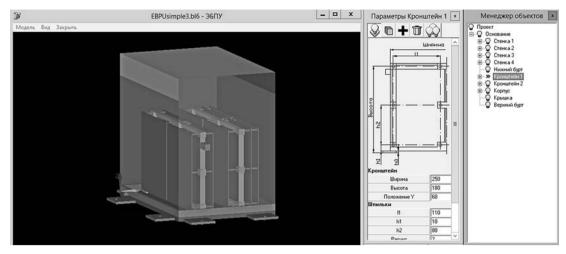


Рис. 6. Процесс редактирования 3D-модели блока сложный ЭБПУ

Т-образную перекладину, П-образную перекладину, лапки, блоки, платы, шпильки, крепления. Параметры кронштейна можно изменять в окне «Параметры».

Объект крестовина — это центральная вертикальная балка крестообразного сечения, которая проходит от нижней до верхней перекладины кронштейна. Параметры крестовины задаются при помощи соответствующей панели. На панели схематично представлено сечение крестовины и его размеры. Изменение этих размеров производится в строках редактирования, расположенных ниже эскиза.

Объект Т-образное сечение, задаваемый с помощью соответствующей панели, представляет собой балку, обрамляющую кронштейн по наружному периметру. Объект П-образное сечение представляет собой нижнюю горизонтальную балку, которая проходит между лапками кронштейна. Параметры этих объектов, а также лапок задаются на специальной панели, открывающейся при выборе данных объектов в менеджере объектов.

Блоки — это местные утолщения на кронштейне, служащие для крепления плат шпильками. Панель блоков позволяет задать толщину блоков. Другие параметры блоков конструктивно определены остальными элементами кронштейна.

К кронштейну можно присоединить произвольное число пар плат. При задании новой пары плат указываются координаты углов платы относительно мест крепления и смещение плат относительно плоскости кронштейнов. Если добавлять сразу несколько плат, то они будут иметь одни и те же параметры и, соответственно, положение в рабочем окне. Поэтому для добавления платы с отличающимися параметрами лучше использовать менеджер объектов. Лишние платы в модели можно удалить, используя контекстное меню в менеджере объектов.

Для шпилек, с помощью которых платы присоединяются к кронштейну, задают радиус их поперечного сечения и координаты их расположения.

Для кронштейна характерно крепление к стенкам блока, что позволяет повысить жёсткость конструкции.

Корпус блока — крепится к основанию. Он состоит из двух маленьких и двух больших стенок. В окне параметров корпуса можно задать параметры каждой из стенок (толщину и высоту).

Контрольные точки. На блоке их можно добавить только к стенкам корпуса. Контрольные точки задаются на панели ввода параметров стенок модели. Для этого необходимо выбрать одну из стенок, добавить контрольную точку, указать её координаты в окне параметров.

Крышка, верхний бурт. Для данных объектов блока нужно задать параметры, приведённые в соответствующих окнах параметров.

При создании блока сложный ЭБПУ в АСОНИКА-САD при выборе этого типа конструкции загрузится интерфейс ввода. При сохранении проекта файл будет иметь расширение bl6. Процесс редактирования 3D-модели блока сложный ЭБПУ представлен на рис. 6. Сохранённая 3D-модель готова для импортирования в АСОНИКА-М-3D.

Блок сложный БРСУ. Интерфейс ввода 3D-модели конструкции блока сложный БРСУ идентичен графическому интерфейсу ввода 3D-модели конструкции блока сложный ЭБПУ. При создании блока сложный БРСУ в АСОНИКА-САD при выборе такого типа откроется интерфейс ввода конструкции. При сохранении проекта файлу присвоится расширение bl7.

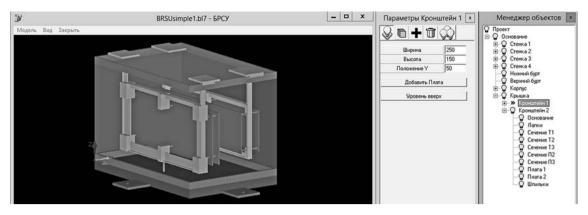


Рис. 7. Процесс геометрического ввода 3D-модели блока сложный БРСУ

При вводе 3D-модели конструкции блока вначале задаются его параметры. Процесс начинается с задания параметров основания. На каждой стенке основания задаются лапки. Затем вводятся параметры нижнего бурта и верхнего бурта. Далее задаются параметры корпуса — стенок, крышки блока. На крышке блока крепятся два кронштейна. В каждый кронштейн вставлены по две платы, для которых вводятся предусмотренные интерфейсом параметры. Результат создания 3D-модели конструкции блока сложного БРСУ представлен на рис. 7. Сохранённая 3D-модель готова для импорта в АСОНИКА-М-3D.

Блок сложный БФКДУ. Для загрузки интерфейса ввода 3D-модели конструкции блока сложный БФКДУ в АСОНИКА-САD выбирается данный тип конструкции. Рассмотрим объекты, составляющие этот блок.

Основание блока — представляет собой плату, к которой снизу могут крепиться рёбра

по контуру платы, а также поперечные или продольные рёбра для придания жёсткости.

 $\it Лапки$ — добавляются с помощью менеджера объектов.

Корпус — располагается на основании и представляет собой коробку без дна. К стенкам корпуса можно добавлять рёбра, которые можно центрировать, выравнивать, добавлять по одному или сразу группой. Панель является одной из стенок корпуса. Она представляет собой плату красного цвета, к ней можно добавлять жёсткие элементы.

Кронштейны — могут быть двух типов: двусторонние и односторонние (по возможности добавления плат).

Контрольные точки — добавляются для удобства просмотра результатов расчётов.

В блоке можно задать пенный блок.

Для увеличения жёсткости конструкции блока соответствующие блоки кронштейнов можно связывать *перемычками*. Для перемычек

следует задать длину, ширину, угол поворота.

Рассмотрим процесс создания блока сложный БФКДУ. В подсистеме ACOHИКА-CAD выбирается этот тип конструкции. После сохранения проекта файл будет иметь расширение bl8.

Создание блока начинается с основания. Его параметры: длина, ширина, толщина, толщина крайних рёбер. Параметры для внешних рёбер: толщина крайних рёбер, высота. В примере, представленном на рис. 8, добавлено четыре внутренних ребра с параметрами ширина, высота, смещение от начала координат.

К основанию с каждой стороны добавлено шесть лапок (для больших сторон — по две лапки, меньших — по одной) с параметрами толщина,

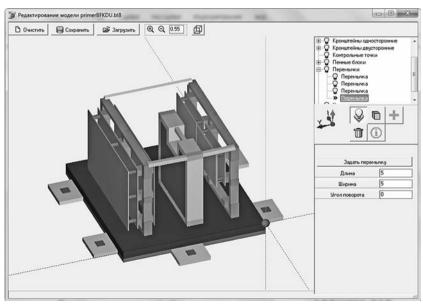


Рис. 8. Графический ввод 3D-модели конструкции блок сложный БФКДУ

длина, ширина, смещение лапки относительно начала координат.

Далее вводятся параметры корпуса: высота и толщина стенок. Параметры стенок: длина и радиус рёбер, смещения рёбер по длине, высоте, в глубину, расстояние между рёбрами.

В рассматриваемом примере в конструкции задан односторонний кронштейн со следующими параметрами: вариант установки плат — верхняя половина, смещение по оси Y, размещение плат по оси Y. Для остова заданы длина сечения по оси Z, ширина сечения, длина и высота остова. Для блоков — длина сечения 1, ширина сечения 1, длина сечения 2 и др. Для шпилек — радиус. В примере добавлены две платы. Заданы размеры плат по осям X и Z, вариант установки — верхняя половина, смещение по оси Y, толщина каждой платы.

Также добавлен двусторонний кронштейн. Его параметры аналогичны параметрам одностороннего кронштейна.

Добавлен пенный блок с параметрами: смещения по осям X, Y и др.

Добавлены перемычки от кронштейнов к пенному блоку, в пенном блоке и между двумя кронштейнами (четыре перемычки). Заданы размеры для всех перемычек: длина и ширина, а также угол поворота. Первая перемычка идёт от верхнего блока двустороннего кронштейна к верху пенного блока, вторая — от верхнего блока одностороннего кронштейна к верху пенного блока, третья расположена в пенном блоке, а четвертой соединены верхние блоки кронштейнов. Результат создания 3D-модели конструкции блока представлен на рис. 8. Сохранённая 3D-модель готова для импорта в АСОНИКА-М-3D.

Блок сложный БСК. Приборы с корпусом типа сложный БСК (рис. 9) относятся к каркасному типу. Они имеют следующую конструктивную схему. На основание, в высоту, устанавливается несколько каркасов. Места наружных межкаркасных жгутов проводного электромонтажа и незакрытые элементы конструкции защищаются боковыми и верхними крышками. Внутри каждого каркаса (этажа) конструкции прибора имеются опорные стойки, стягивающие горизонтальные плоскости совместных каркасов. Этим устраняются инерционные прогибы горизонталей при механических нагрузках. Для крепления прибора на изделие используются отверстия в лапках. Список элементов блока сложный БСК представлен на рис. 10.

Основание — деталь прибора, играющая роль опорно-несущего элемента конструкции. Представляет собой плоскую массивную

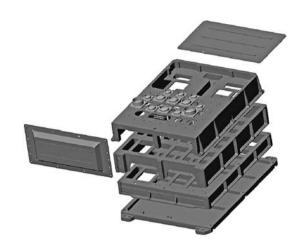


Рис. 9. Корпус сложный БСК



Рис. 10. Элементы блока сложный БСК

плиту прямоугольной формы. Для придания прочности в основании имеются рёбра жёсткости, а также местные утолщения материала (рёбра по контуру) — места подстыковки других элементов конструкции. Плата основания блока сложный БСК с параметрами аналогична плате основания блока сложный БФКДУ.

Лапки — элементы конструкции, через которые прибор закрепляется на изделии. Они выполняются как единое целое с деталью, посредством которой прибор сопрягается с изделием. Число и расположение лапок могут изменяться в зависимости от условий установки прибора.

Корпус прибора — располагается на основании и представляет собой совокупность каракасов, боковой и верхней крышек. Каркас (этаж) — элемент конструкции, в котором устанавливаются электрорадиоизделия (ЭРИ) и осуществляется электромонтаж прибора. Каркас выполнен в виде короба, имеющего боковые стенки и одну горизонтальную поверхность. Горизонтальная поверхность относительно боковых сторон может располагаться в их верхней части, посередине, в нижней части. При создании модели на горизонтальную поверхность каркаса добавляют вырезы и блоки. Для придания прочности в деталях имеются рёбра жёсткости, расположенные в верхней части каркаса, перпендикулярно к его

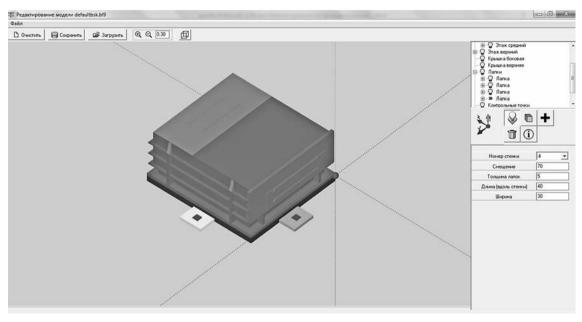


Рис. 11. Итоговая модель блока сложный БСК

боковым стенкам, а также местные утолщения материала (каёмки) — места подстыковки других элементов конструкции. На боковые стенки каркаса можно добавлять рёбра. Каркасы разделяются на три вида: нижний этаж, средние этажи и верхний этаже. У средних этажей, так же как и у верхнего, вместо одной из боковых стенок имеется правое ребро с вырезами. Вырезы отцентрованы относительно середины правого ребра. Верхний этаж имеет выдавку под верхнюю крышку. При создании модели для каждого этажа добавляются шпильки. Многие размеры автоматизированная система вычисляет сама в зависимости от размеров этажей.

Боковая и верхняя крышки — защитно-декоративные элементы конструкции, предназначенные для закрытия наружных проводов электромонтажа прибора и открытых элементов конструкции. Для придания прочности в деталях имеются укрепляющие выдавки, число и размеры которых можно изменять (редактировать).

Контрольные точки — добавляются для удобства просмотра результатов расчётов. Их можно расставлять на стенках корпуса. Для этого надо задавать координаты точки так, чтобы она оказалась на одной из сторон корпуса.

При создании 3D-модели конструкции блока сложный БСК в ACOHИКA-CAD выбирается такой блок. Загрузится интерфейс ввода. При сохранении проекта создастся файл с расширением bl9.

В 3D-модели конструкции, представленной на рис. 11, заданы основание с рёбрами жёсткости, нижний этаж с девятью вырезами

и девятью блоками. Введены первый, второй средний и верхний этажи. На следующем этапе заданы параметры крышек. В завершение работы добавлены четыре лапки, по одной на каждой стороне основания. Итоговый результат — 3D-модель блока — представлен на рис. 11. Сохранённая 3D-модель блока сложного БСК готова к импорту в АСОНИКА-М-3D.

Блок сложный БСКЭ32. Для загрузки интерфейса ввода 3D-модели конструкции в АСОНИКА-САD выбирается тип конструкции блок сложный БСКЭ32. Интерфейс ввода 3D-модели конструкции блока сложный БСКЭ32 аналогичен интерфейсу ввода блока сложный БСК.

Внешне корпус прибора представляет собой прямоугольный параллелепипед с лапками для закрепления прибора. К основанию прикреплён кожух. Верхней поверхностью параллелепипеда является верхняя панель, также прикреплённая к кожуху. Рассмотрим типовые элементы конструкции, из которых состоит блок сложный БСКЭ32.

Основание — представляет из себя плату, к которой снизу могут крепиться рёбра по контуру платы, а также поперечные или продольные рёбра для придания жёсткости конструкции.

В основании есть *лапки* с отверстиями, через которые прибор болтами закрепляется на изделии. При установке прибора к лапкам прикладывается усилие, обеспечивающее выполнение условия нераскрытия стыка прибор — изделие во время максимальных нагрузок на прибор, а также условия обеспечения теплового интерфейса (усилие прижатия к термоплите

не менее 10 кгс/см²). Усилие задаётся и контролируется моментом затяжки болтов крепления прибора к изделию. Прибор должен сохранять работоспособность в случае, если число точек крепления станет на одну меньше по сравнению с исходным. Форма и размещение лапок произвольны и обусловлены не только требованиями, описанными выше, но и удобством компоновки прибора на изделии.

Корпус — располагается на основании и представляет собой кожух, состоящий из стенок двух видов и панели с элементами жёсткости. Кожух является зашитной оболочкой и изготавливается из листового материала. Он имеет вид прямоугольной трубы с внутренними радиусами гиба по углам, равными двум толщинам листа, либо состоит из частей, образующих в результате сборки боковые поверхности прибора. На боковых поверхностях, вдоль образующих, выполнены выдавки, выполняющие роль рёбер жёсткости. Сечение выдавок — полукруг с внутренним радиусом гиба, равным пяти толщинам листа, или прямоугольник шириной 10...28 мм и высотой 1...3,5 мм. Выпуклостью выдавка может быть направлена как внутрь, так и наружу кожуха. Выдавки можно центрировать, выравнивать, добавлять по одной или группой. Панель представляет собой плату, на ней можно устанавливать жёсткие элементы как с наружной, так и с внутренней стороны, а также размещать верхний бурт.

Кронштейны — могут быть двух типов. Кронштейны первого типа предназначены для расположения этажерок печатных плат. Платы в этажерке соединяются шпильками. Такой кронштейн крепится к основанию, также имеется возможность крепить его шпильками к панели. Кронштейны второго типа предназначены для установки жёстких элементов и пенных блоков. Такой кронштейн имеет произвольное число креплений к основанию. Вся группа кронштейнов обоих типов соединяется боковыми пластинами. Число кронштейнов обоих типов произвольное.

Кронштейн первого типа имеет дерево, состоящее из следующих объектов: остов, платы, шпильки. С каждой боковой стороны кронштейна может быть установлено несколько этажерок. На платах могут располагаться ЭРИ. Для шпилек можно также задавать радиус их поперечного сечения.

При построении 3D-модели кронштейны второго типа добавляются аналогично кронштейнам первого типа. В дереве объектов кронштейна второго типа задаются параметры крепления, параметры плат с жёсткими элементами, расположенными на них, а также параметры пластин, расположенных с боков кронштейна.

Контрольные точки — добавляются для удобства просмотра результатов расчётов. Их можно расставлять на стенках корпуса.

Для повышения жёсткости конструкции кронштейны связываются между собой боковыми пластинами. При моделировании боковые пластины добавляются автоматически, их размеры можно изменять.

Рассмотрим процедуру создания блока сложный БСКЭ32, 3D-модель которого приведена на рис. 12. В подсистеме АСОНИКА-САD выбирается данный тип конструкции. Загрузится интерфейс ввода. При сохранении файл

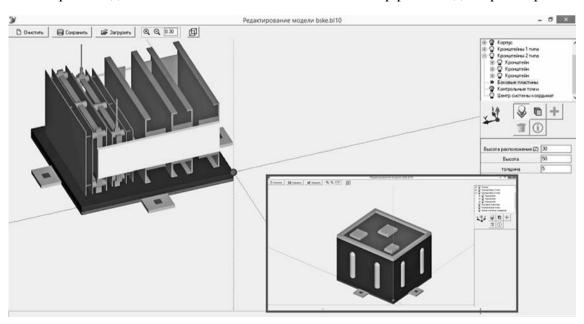


Рис. 12. Итоговая модель блока сложный БСКЭ32

получит расширение bl10. В примере, приведённом на рис. 12, все данные представлены в миллиметрах.

Процесс создания блока начинается с ввода основания с рёбрами жёсткости. Далее добавляется по одной лапке на каждую сторону основания. Затем задаются параметры корпуса блока: высота и толщина стенок. Для каждого объекта типа стенка корпуса вводятся предусмотренные интерфейсом параметры. Далее добавляются два ребра.

На следующем этапе вводится объект панель. В примере, приведённом на рис. 12, добавлены три элемента жёсткости на панель.

Затем вводятся два кронштейна первого типа с платами и три кронштейна второго типа с платами.

Далее задаются параметры боковых пластин, соединяющих все кронштейны. На этом моделирование блока сложный БСКЭ32 завершается, после сохранения проекта его можно импортировать в АСОНИКА-М-3D для проведения расчётов.

Импорт конструкции в АСОНИКА-М-3D. После создания трёхмерных моделей деталей и сборок в АСОНИКА-САD их следует импортировать в АСОНИКА-М-3D. Для этого в АСОНИКА-М-3D сначала создаётся новый проект. После его сохранения на панели инструментов АСОНИКА-М-3D становится доступной кнопка «Импорт». При нажатии на неё можно выбрать файл 3D-модели необходимой конструкции. Это могут быть не только 3D-модели, созданные с помощью АСОНИКА-САD (формат blN), но и модели других систем для моделирования конструкции (форматы IGES, SAT), а также проекты из АСОНИКА-ТМ (файлы формата рса).

После нажатия на кнопку «Открыть» запускается процесс импорта модели, и вскоре модель отображается в рабочей области программы. Сохранив проект после импорта, с ним можно осуществлять дальнейшие действия.

Подготовка конструкции к расчёту. После импорта необходимо подготовить модель к расчётам. Для этого выполняются следующие действия: задаются материалы, механические воздействия, крепления, тепловые граничные условия, параметры конечно-элементного разбиения, генерируется конечноэлементная сетка.

При помощи кнопки п на панели инструментов можно задавать материал для всей конструкции. Помимо этого, для каждой детали (группы деталей) есть возможность задать материал отдельно при помощи контекстного меню в дереве объектов. При выборе матери-

ала из базы данных (БД) (кнопка «Загрузить из БД») в незаполненную вкладку «Механические» вносятся данные по всем параметрам, необходимым для расчётов. Вкладка «Дополнительно» содержит параметр добавочная масса, учитывающий массу немоделируемых частей конкретной детали или объём этих частей, влияющий на расчёт плотности.

Механические воздействия задаются кнопкой на панели инструментов. В зависимости от типа воздействия последовательно по точкам вводится частотная либо временная зависимость для ускорения. Для случайной вибрации вводится частотная зависимость для спектральной плотности ускорения. Предварительно требуется задать диапазон воздействия и шаг, с которым решатель будет выбирать точки в пределах диапазона для проведения расчёта и записи результатов в файл. От шага в значительной мере зависят точность и время расчёта.

График воздействия вводится следующим образом. Нажатием правой кнопки мыши в поле ввода графика вводится новая точка. Можно перемещать точку, удерживая левую кнопку мыши на введённой точке и перемещая курсор в пределах поля ввода графика или изменяя координаты в полях ввода в верхней части окна.

Добавление точек осуществляется нажатием правой кнопки мыши в области ввода графика. Причём новые точки автоматически соединяются линиями с введёнными ранее.

Введённая точка удаляется щелчком правой кнопки мыши.

Весь график можно удалить, сохранить и загрузить нажатием на соответствующую кнопку, расположенную слева над областью ввода графика.

Информацию обо всех видах механических воздействий можно сохранить в виде текстовых файлов. Файлы имеют следующие расширения, которые зависят от вида воздействия:

in1 — гармоническая вибрация;

in2 — случайная вибрация;

in3 — однократный удар;

іп3а — многократный удар;

in4 — линейное ускорение.

В программе реализована возможность задавать крепления следующих типов: по линии или поверхности, в узле, круглое и прямоугольное. Заданные крепления автоматически заносятся в дерево объектов, в раздел «Крепления».

Все типы креплений имеют общие параметры, находящиеся в разделе «Ограничение степеней свободы». Диалоговое окно «Параметры креплений» вызывается через контекстное меню «Свойства» дерева объектов при

выделении соответствующего крепления в дереве. По умолчанию крепление ограничивает все три степени свободы (по осям X, Y и Z), по и против направления соответствующей оси. Можно реализовать частичное закрепление, например по двум осям или по одной оси.

Перед проведением расчёта требуется получить конечно-элементную модель конструкции. Процесс *генерации конечно-элементной сетки* запускается командой на панели инструментов.

Библиографические ссылки

1. **Автоматизированная** система АСОНИКА для моделирования физических процессов в радиоэлектронных средствах с учётом 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.
- 2. **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.
- 3. **Шалумов М.А., Шалумов А.С.** Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир, Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.

Ссылка для цитирования

Шалумов А.С., Першин Е.О., Шалумов М.А. АСОНИКА-М: моделирование типовых конструкций блоков электроники на механические воздействия // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 387—397.

УДК 658.5

Ю.Г. Кабалдин, д-р техн. наук, **П.В. Колчин, Д.А. Шатагин, А.В. Киселев** (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

uru.40@mail.ru

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ 3D-ПЕЧАТЬ И МЕХАНИЧЕСКУЮ ОБРАБОТКУ НА СТАНКАХ С ЧПУ В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Рассмотрена гибридная технология, включающая в себя 3D-печать и механическую обработку напечатанной заготовки в рабочей зоне станка с ЧПУ. Представлена структура аппаратно-программного комплекса, который позволяет реализовать 3D-печать заготовок электродуговой наплавкой на металлорежущих станках с ЧПУ, с возможностью подключения модулей высокопроизводительных вычислений и глубокого обучения нейронных сетей с обеспечением обратной связи. Описан процесс функционирования указанных модулей при оптимизации режимов 3D-печати. Представлены результаты исследования процессов, протекающих во время 3D-печати на металлорежущем станке с ЧПУ, полученные с помощью датчиков акустической эмиссии.

Ключевые слова: цифровое производство; искусственный интеллект; интеллектуальное управление оборудованием; 3D-печать; гибридные технологии; контроль качества структуры деталей при 3D-печати; акустическая эмиссия.

A hybrid technology including 3D printing and machining of a printed blank in the working area of a CNC machine is considered. The structure of the hardware and software complex is presented that allows 3D printing of blanks by electric arc deposition on CNC machine tools with the ability to connect high-performance computing modules and deep training of neural networks with feedback ensuring. The operation of these modules at optimizing 3D printing modes is described. The results of the investigation of the processes occurring during 3D printing on a CNC machine with the help of acoustic emission sensors are introduced.

Keywords: digital production; artificial intelligence; intellectual control of equipment; 3D printing; hybrid technologies; quality control of structure of the parts at 3D printing; acoustic emission.

Принятая Правительством России программа «Индустрия 4.0» с целью оцифровать машиностроительные производства обусловливает

необходимость широкого внедрения киберфизических систем. Основными компонентами этой программы принято считать большие

базы данных, интернет вещей, виртуальную и дополненную реальность, 3D-печать, автономные роботы, гибридные технологии и т. д.

Новая промышленная революция предлагает качественно новые возможности повышения эффективности производства, однако и требования к автоматизации новые технологии предъявляют совершенно другие. Иначе говоря, уже стоит говорить не столько об автоматизации, сколько о практически полной оцифровке производства.

В Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева разработан аппаратно-программный комплекс для гибридной технологии обработки деталей, включающей 3D-печать электродуговой наплавкой на металлорежущих станках с ЧПУ. В комплексе обеспечиваются возмож-

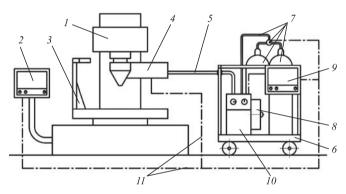


Рис. 1. Общая схема комплекса:

оборудование: 1 — металлорежущее оборудование с ЧПУ; 2 — пульт управления обрабатывающим оборудованием;

встраиваемый комплекс: 3 — ячейка для хранения печатающей головки; 4 — печатающая головка; 5 — гибкий шланг для подачи защитного газа и проволоки; 6 — подвижная платформа; 7 — система подачи защитного газа; 8 — катушка с проволокой; 9 — пульт управления системой 3D-печати; 10 — сварочный аппарат; 11 — система информационной связи между компонентами

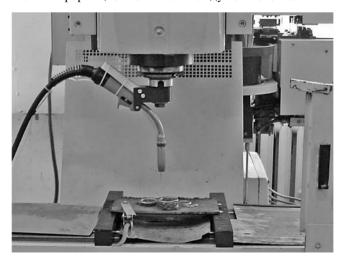


Рис. 2. Общий вид комплекса, установленного на станок

ности подключения модулей высокопроизводительных вычислений и глубокого обучения нейронных сетей с обратной связью для оптимизации режимов электродуговой наплавки в процессе 3D-печати и получения качественной структуры напечатанных деталей [1].

Необходимо отметить, что одним из существенных недостатков, например, лазерных технологий 3D-печати металлом [2] являются высокая шероховатость деталей, а также отсутствие контроля качества формируемой структуры металла.

Разработанный аппаратно-программный комплекс позволил расширить функциональные возможности станков с ЧПУ, используемых в настоящее время в механообрабатывающих производствах и не отвечающих требованиям цифровых производств. Установка разработанного комплекса позволяет осуществлять 3D-печать заготовок в рабочей зоне станка с высокой производительностью процесса — до 12 кг/ч. При этом если технологический процесс производства детали не требует на данном оборудовании 3D-печати, то комплекс может быть снят со станка и установлен на другой станок, где 3D-печать при производстве необходима. Помимо этого, комплекс может быть применён для сварки деталей, проводимой как в зоне станка с ЧПУ, так и при необходимости вручную.

Набор датчиков автоматически позволяет диагностировать процесс печатания заготовки благодаря контролю режимов наплавки, температуры, при которой происходит расплавление проволоки, и процесса охлаждения с использованием акустической эмиссии (АЭ), а также применению других методов неразрушающего контроля структуры металла детали.

Преимущества предлагаемого комплекса выделяют его среди ближайших аналогов, представляющих собой единую громоздкую конструкцию, что не позволяет снимать и перемещать на другое оборудование элементы, отвечающие за 3D-печать [1]. Общая схема комплекса представлена на рис. 1.

Предложенная схема была установлена на станке с ЧПУ ГФ2171С6 в лаборатории кафедры «Технология и оборудование машиностроения» НГТУ им. Р.Е. Алексеева. В основе комплекса лежит полуавтомат для сварки электродом-проволокой в среде защитных газов с переоборудованной под печатающую головку сварочной горелкой. Сам комплекс напрямую подключён к электрической схеме и системе ЧПУ станка. Общий вид комплекса, установленного на станок, представлен на рис. 2.

При подготовке станка к 3Dпечати проводится монтаж комплекса на станок, устанавливается ячейка для хранения печатающей головки и на неё устанавливается печатающая головка. Комплекс подключается выводами к системе ЧПУ станка для передачи и получения данных. Подложка, на которой будет производиться печать, также подключается к комплексу. Далее на станок загружается комплексная программа, содержащая элементы траекторий для 3D-печати печатающей головкой и траектории для металлорежущего инструмента. Загруженная программа запускается со стойки, и шпиндель станка под действием механических передач подходит к ячейке для хранения печатающей головки и захватывает её. Затем станок подводит печатающую головку к подложке, и программа даёт команду станку на перемещение рабочих органов по заданной траектории, а комплексу — на включение тока, подачу проволоки и защитного газа. В процессе наплавки металла по траектории

в рабочей зоне станка формируется заготовка или часть заготовки будущего изделия. В зависимости от технологии печать и механическая обработка напечатанной заготовки могут чередоваться неограниченное число раз. После завершения 3D-печати шпиндель станка устанавливает печатающую головку обратно в ячейку для её хранения и по программе из инструментального магазина вызывается необходимый режущий инструмент, который устанавливается в шпиндель станка. Данный инструмент выполняет чистовую механическую обработку заготовки — удаление припуска. На комплексе был выполнен ряд экспериментов по наплавке заготовки детали и её окончательной механической обработке. Их результаты представлены на рис. 3.

Помимо стандартной функции 3D-печати аппаратно-программный комплекс позволяет подключать дополнительные модули высокопроизводительных вычислений технологии nVidia CUDA и глубокого обучения нейронных сетей [3, 4] с обеспечением обратной связи для оптимизации режимов электродуговой наплавки в процессе 3D-печати.

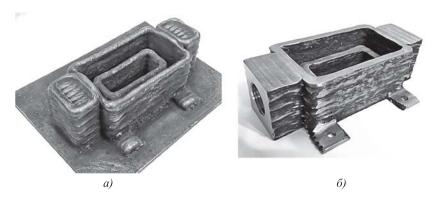


Рис. 3. Заготовка после 3D-печати (a) и деталь после механической обработки (δ)

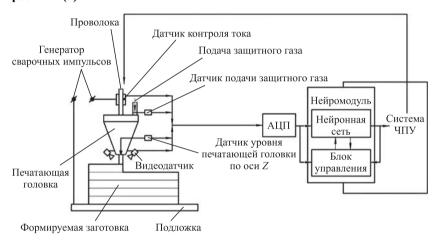


Рис. 4. Схема функционирования системы оптимизации режимов 3D-печати

Схема функционирования системы оптимизации режимов 3D-печати представлена на рис. 4, а полная структура интеллектуальной гибридной киберфизической системы механической обработки с возможностью 3D-печати и использованием облачных технологий приведена на рис. 5. Система работает следующим образом. Видеодатчик собирает информацию о расстоянии между формируемым слоем и торцем печатающей головки, данные о ширине и длине сварочной ванны. Датчик контроля тока собирает данные о величине и продолжительности сварочных импульсов и прерывистости или непрерывности процесса наплавки. Датчик подачи защитного газа собирает данные о поступлении защитного газа в зону печати. Датчик уровня печатающей головки передаёт показания о текущем положении печатающей головки по оси Z. Датчик контроля наличия проволоки (на рис. 4 не показан) передаёт данные о наличии проволоки в зоне наплавки и оставшемся её количестве. Датчики скорости (на рис. 4 не показаны) передают данные о скорости подачи проволоки и скорости перемещения печатающей голов-

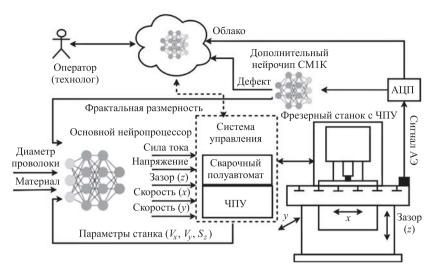


Рис. 5. Структура интеллектуальной гибридной киберфизической системы механической обработки с возможностью 3D-печати и использованием облачных технологий

ки вдоль формируемого слоя. Датчик температуры регистрирует температуру наплавки, а датчик АЭ регистрирует сигналы как при печатании детали, так и при её остывании. Все сигналы с датчиков поступают в аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), где преобразуются в цифровой сигнал, после чего передаются в нейромодуль. В нейромодуле выполняются обработка полученной информации и вычисления в целях принятия решения по оптимизации процесса 3D-печати. Все данные поступают на хранение в облако или отдельное серверное хранилище предприятия. Таким образом, входными параметрами для системы являются:

расстояние между формируемым слоем и торцем печатающей головки;

ширина и длина сварочной ванны;

величина и продолжительность сварочных импульсов;

данные о непрерывности процесса наплавки; данные о поступлении защитного газа в зону печати;

текущее положение печатающей головки по оси Z:

данные о наличии проволоки и оставшемся её количестве;

текущая скорость перемещения печатаюшей головки;

текущая скорость подачи проволоки.

Для системы при оптимизации режимов печати являются выходными параметры следующих её элементов:

генератора импульсов сварочного тока; механизма подачи проволоки;

механических частей станка, отвечающих за положение печатающей головки по оси Z:

механических частей станка, отвечающих за скорость перемещения печатающей головки;

электрической схемы станка, отвечающей за включение сварочного тока, подачу проволоки и зашитного газа.

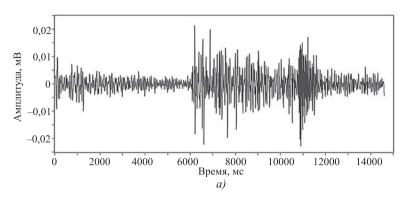
Все выходные параметры аппаратно-программного комплекса напрямую связаны с системой ЧПУ станка (сетевое взаимодействие). Исходя из полученных данных нейромодуль может отдавать команды системам ЧПУ на подъём или опускание печатающей головки к зоне наплавки, увеличение или уменьшение скорости подачи проволоки

и скорости перемещения печатающей головки вдоль формируемого слоя, корректировать величину и частоту сварочных импульсов, тем самым обеспечивая оптимальные режимы 3D-печати со стабильными размерами формируемой заготовки и требуемой структурой её материала. Если в аппаратно-программном комплексе закончится защитный газ или наплавочная проволока, то система на основании информации датчиков отдаст команду на остановку печати с выдачей сообщения о необходимости замены газовых баллонов или установки новой катушки с проволокой.

Таким образом, аппаратно-программный комплекс 3D-печати электродуговой наплавкой, устанавливаемый на металлорежущем оборудовании с ЧПУ, совместно с подключением дополнительных модулей высокопроизводительных вычислений и глубокого обучения с обеспечением обратной связи для оптимизации режимов 3D-печати способен существенно расширять возможности оборудования с ЧПУ действующего производства, определять и назначать оптимальные режимы 3D-печати для получения наилучшего качества напечатанных заготовок и минимизации производственного брака.

Основной нейропроцессор (см. рис. 5) представляет собой связку управляющего микроконтроллера с нейроморфным процессором СМ1К, обеспечивающим формирование задающего воздействия для системы управления станком с ЧПУ и сварочным полуавтоматом. В состав нейроморфного процессора входит кристалл, изготовленный по технологии

130 нм и содержащий сеть из 1024 нейронов, работающих на частоте 27 МГц. На входной слой нейропроцессора поступает информация о диаметре используемой проволоки, её мате-



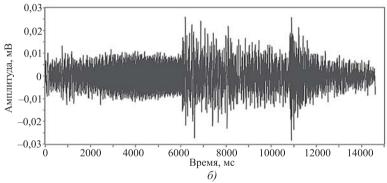


Рис. 6. Импульсы сигнала АЭ с использованием wavelet-фильтра (a) и без его использования (б)

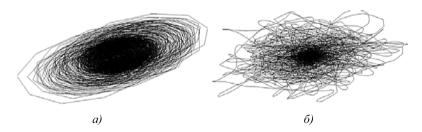


Рис. 7. Аттракторы сигнала процесса наплавки: a — устойчивый процесс структурообразования (D_F = 5,3); δ — неустойчивый процесс (D_F = 7,8)

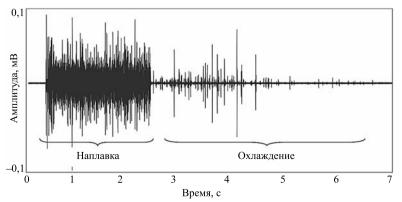


Рис. 8. Сигнал АЭ, включающий процесс наплавки и охлаждения наплавленного металла

риале, а также текущее значение фрактальной размерности сигнала АЭ и параметры станка (скорость перемещения стола по координатам X и Y (V_x и V_y), зазор между горелкой и

столом z). На основе входных данных нейропроцессор формирует определённое состояние выходных нейронов, которые определяют вектор состояния для задающего воздействия. Выходными параметрами основного нейропроцессора являются сила тока на сварочном полуавтомате, напряжение, зазор между горелкой и столом, скорость перемещения стола по координатам Х и Ү. Так как нейропроцессор встроен в контур обратной связи со станком и сварочным аппаратом, то у системы появляется возможность самоадаптации к оптимальным режимам печати. В качестве критерия оптимальности выбрана фрактальная размерность аттрактора сигнала АЭ [5]. В процессе работы все сигналы с датчика АЭ оцифровываются и отправляются в облако на хранение и в последующем используются для переобучения нейронной сети. Таким образом, подобные системы могут накапливать опыт и обмениваться им между аналогичными системами [6]. В состав нейроморфного процессора также входит дополнительный нейрочип СМ1К, обученный для выявления типовых дефектов наплавки. Для повышения точности определения фрактальной размерности D_F аттрактора сигнала АЭ используются специальные wavelet-фильтры, позволяющие убрать шумовую составляющую, применяя декомпозицию сигнала на разных уровнях на полезную и вредную составляющие (рис. 6).

На рис. 7 приведены аттракторы сигналов АЭ при различных режимах наплавки, т. е. при оптимальном (устойчивом) и неустойчивом процессах наплавки. Как показано в работе [5], чем меньше D_F , тем устойчивей структурное состояние металла при охлаждении (кристаллизации).

На рис. 8 показан сигнал АЭ, включающий процессы наплавки и охлаждения наплавленного металла.

Наличие крупных дефектов в структуре наплавленной заготовки

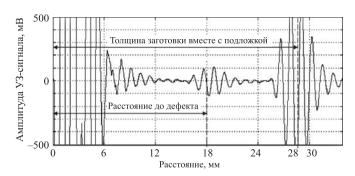


Рис. 9. Ультразвуковой сигнал, показывающий наличие дефекта — непровара в основании заготовки

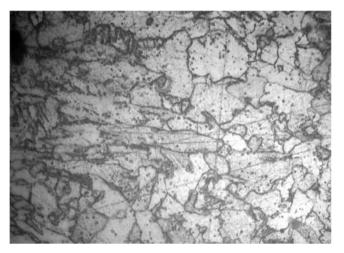


Рис. 10. Микроструктура заготовки из стали 08Г2С

проверяли на дефектоскопе УСД-50. На рис. 9 представлена дефектограмма, показывающая наличие дефекта — непровара у основания заготовки.

На рис. 10 показана микроструктура детали (см. рис. 3, δ) из стали 08Г2С, свидетельствующая об отсутствии в ней дефектов в виде пор, микротрещин и др.

Проведённые исследования позволили заключить, что в условиях цифрового производства научный и практический интерес представляет разработка гибридных технологий, совмещающих 3D-печать и механическую обработку, с использованием модулей с обученной нейронной сетью, которые могут применяться для имеющихся металлорежущих станков с ЧПУ. Такие технологии позволят устранить указанные выше недостатки 3D-печати и получать детали с заданными точностью и шероховатостью, с бездефектной структурой, а также обеспечить интеллектуальное управление оборудованием как при 3D-печати заготовок, так и при их механической обработке.

Библиографические ссылки

- 1. **Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В.** 3D-печать на металлорежущем оборудовании // РИТМ Машиностроения. 2016. № 6. С. 20—22.
- 2. Сапрыкин А.В., Сапрыкина Н.А., Ибрагимов И.А., Бабакова Е.В. Влияние послойного лазерного спекания (плавления) на качество поверхности изделия // Фотоника. 2016. № 1. С. 40—48.
- 3. **Кабалдин Ю.Г., Биленко С.В., Серый С.В.** Управление динамическими процессами в технологических системах механообработки на основе искусственного интеллекта. Комсомольск-на-Амуре: Изд-во Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та, 2003. 201 с.
- 4. **Кабалдин Ю.Г.**, **Лаптев И.Л.**, **Шатагин Д.А.**, **Серый С.В.** Диагностика выходных параметров процесса резания в режиме реального времени на основе фрактального анализа и вейвлет-анализа с использованием программно-аппаратных средств National Instruments и Nvidia CUDA // Вестник машиностроения. 2014. № 8. С. 80—82.
- 5. Оценка и диагностика структурной устойчивости металлов при низких температурах на основе подходов нелинейной динамики и искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, Д.А. Шатагин, М.С. Аносов и др.; под ред. Ю.Г. Кабалдина; Н. Новгород, Нижегородский гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2017. 210 с.
- 6. **Промышленный** интернет на практике: удаленная диагностика станков с ЧПУ с помощью технологии Winnum. URL: http://www.controlengrussia.com/(дата обращения 28.01.2018).

Ссылка для цитирования

Кабалдин Ю.Г., Колчин П.В., Шатагин Д.А., Киселев А.В. Интеллектуальное управление гибридной технологией, включающей 3D-печать и механическую обработку на станках с ЧПУ в условиях цифровых производств // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 397—402.

Уважаемые читатели!

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

УДК 621.787

М.А. Тамаркин, д-р техн. наук, проф.,

Э.Э. Тищенко, канд. техн. наук, доц., **А.С. Шведова,** канд. техн. наук (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

tenh rostov@mail.ru

УВЕЛИЧЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ИЗДЕЛИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Представлены результаты исследований процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования в гранулированных средах с точки зрения увеличения их периода эксплуатации. Установлены зависимости для определения шероховатости поверхности, глубины упрочнённого слоя и степени деформации для различных динамических методов обработки поверхностным пластическим деформированием в гранулированных средах. Проведено исследование остаточных напряжений методом конечных элементов. Определено рациональное время обработки. Разработаны методика оптимизации по критерию оптимальная интенсивность деформаций и блок автоматизированного проектирования технологических процессов.

Ключевые слова: жизненный цикл изделия; долговечность изделия; обработка деталей; динамические методы поверхностного пластического деформирования; качество поверхности; глубина упрочнённого слоя; степень деформации; остаточные напряжения; время обработки; методика оптимизации технологических процессов.

The research results of the parts processing by dynamic methods of surface plastic deformation in granular media in terms of increasing their service life are introduced. Dependencies for determining the surface roughness, the depth of the strengthened layer, and the degree of deformation for various dynamic methods of surface plastic deformation processing in granular media are established. The residual stresses research by the finite element method is carried out. The rational processing time is determined. The optimization technique by the criterion of optimal strain intensity and the block of automated design of technological processes are developed.

Keywords: life cycle of product; product durability; processing of parts; dynamic methods of surface plastic deformation; surface quality; depth of the strengthened layer; degree of deformation; residual stresses; time of processing; methodology of technological processes optimization.

Вопросы увеличения жизненного цикла изделия чрезвычайно актуальны в условиях современного производства. Жизненный цикл изделия представляет собой совокупность процессов начиная с создания этого изделия до его утилизации. В целом жизненный цикл любого машиностроительного изделия можно разбить на следующие основные этапы: проектирование, производство, техническая эксплуатация и утилизация. Учёт этапов жизненного цикла позволяет рационально спланировать деятельность по проектированию, производству и обслуживанию продукции, уменьшить издержки на доработку изделия. Учёт всех этапов жизненного цикла изделия существенно усложняет задачу проектирования и производства продукции, однако это значительно облегчается с внедрением в производство автоматизированных систем, в том числе систем автоматизированного проектирования технологических процессов на фи-

нишных операциях получения машиностроительных изделий.

Методы поверхностного пластического деформирования (ППД) часто применяют при разработке технологических процессов финишной обработки деталей. При ППД происходит пластическое деформирование тонкого поверхностного слоя обрабатываемой детали и не образуется стружка. Такой вид обработки позволяет повысить долговечность деталей, в том числе работающих в условиях циклических нагрузок, трения и воздействия коррозионных сред. В процессе ППД при обработке поверхности детали одновременно происходит упрочнение её поверхностного слоя. Большой интерес инженеров к методам обработки ППД объясняется их широкими технологическими возможностями и существенными техникоэкономическими преимуществами.

Методы ППД по характеру прилагаемой нагрузки подразделяют на статические и ди-

намические [1]. При обработке статическими методами ППД деформирующий инструмент или рабочие среды воздействуют на поверхность обрабатываемых деталей с некоторым постоянным усилием. Происходит плавное перемещение инструмента и, соответственно, очага деформации под ним по всей поверхности детали, подлежащей обработке. При динамических методах ППД рабочие среды, чаще всего в виде стальных полированных шариков, воздействуют на поверхность обрабатываемых деталей многократными соударениями. Сила соударений изменяется в каждом цикле воздействия рабочей среды от минимального до максимального значения. Обработке может подвергаться вся поверхность детали или её отдельные участки.

Динамические методы ППД получили широкое применение в современном машиностроительном производстве. Обработка данными методами позволяет при сравнительно низких производственных затратах в несколько раз повысить сопротивление усталости, износостойкость, контактную жёсткость деталей. Упрочнение обусловлено формированием в поверхностном слое сжимающих остаточных напряжений, увеличением микротвёрдости, а также глубины и степени деформации.

Процессы обработки деталей динамическими методами ППД и достигаемые при этом технологические параметры подробно изучены в работах [2, 3]. Результаты обработки динамическими методами ППД можно описать множеством критериев: параметрами шероховатости поверхности, глубиной и степенью деформации упрочнённого слоя, максимальной реализацией резервов упрочнения материала обрабатываемых деталей. В работах авторов [2-5] и др. получены уравнения, учитывающие особенности динамического взаимодействия частиц рабочей среды с поверхностью детали. Эти зависимости позволяют рассчитать значения параметров шероховатости поверхности, глубины и степени деформации при различных сочетаниях технологических параметров, среди которых можно выделить управляемые (режимы обработки для соответствующего метода и характеристики рабочих сред) и неуправляемые (физико-механические характеристики обрабатываемого материала). Так, параметр шероховатости поверхности Ra_{vct} можно определить, используя зависимость

$$Ra_{\text{yct}} = k\sqrt{\frac{h_{\text{max}}abl_{\text{ед}}}{R^2}},$$

а глубина упрочнённого слоя h_n и степень деформации ε определяются как

$$h_n = 3.8R \left[1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{b}{a} \right)^4 \right] \sqrt{V_{\vartheta \phi} \sin \alpha} \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{III}}}{k_c c \sigma_{\text{T}}}};$$

$$\varepsilon = 0.8 \sqrt{V_{\vartheta \phi}} \sqrt[4]{\frac{\rho_{\text{III}}}{H B^{1,12} \cdot 10^6}}.$$

В приведённых формулах используются следующие обозначения: k — эмпирический коэффициент; h_{\max} — максимальная глубина внедрения шарика в поверхность детали; a, b — большая и малая полуоси эллипса контакта; $l_{\rm eg}$ — единичная длина, введённая для сохранения размерности; R — радиус шарика; $V_{\rm эф}$ — эффективная скорость соударения шарика с поверхностью детали; α — угол встречи шарика с поверхностью детали; $\rho_{\rm III}$ — плотность материала шарика; $\sigma_{\rm T}$ — предел текучести материала детали; c — коэффициент несущей способности контактной поверхности; k_c — коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; HB — твёрдость по Бринеллю.

Для проверки адекватности полученных теоретических зависимостей был проведён значительный объём экспериментальных исследований. Обработке динамическими методами ППД (вибрационной, центробежноротационной и др.) подвергались образцы из различных материалов (сталей 45 и ХВГ, коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, латуни ЛС59-1, алюминиевого сплава Д16 и др.) с использованием в качестве рабочей среды стальных полированных шариков разного диаметра.

Проведено сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований. Некоторые полученные графики представлены на рис. 1...5. Теоретические данные представлены сплошной линией, а точками нанесены значения, полученные в результате экспериментальных исследований. Построены доверительные интервалы с доверительной вероятностью 95 %. Установлено, что расхождение результатов теоретических и экспериментальных исследований не превышает 15 %.

Остаточные напряжения, формирующиеся в поверхностном слое в процессе обработки деталей динамическими методами ППД, оказывают значительное влияние на их эксплуатационные свойства при знакопеременных нагрузках. Основную роль играют величина и знак остаточных напряжений, а также характер их распределения по глубине поверхностного слоя детали. Теоретически рассчитать

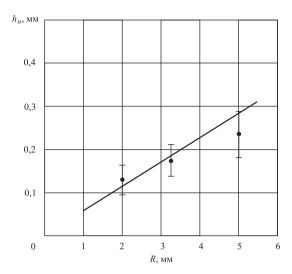


Рис. 1. Зависимость глубины упрочнённого слоя от радиуса шарика при центробежно-ротационной обработке детали из сплава Д16

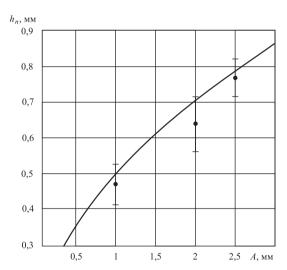


Рис. 2. Зависимость глубины упрочнённого слоя от амплитуды A колебаний рабочей камеры при вибрационной обработке детали из стали 45

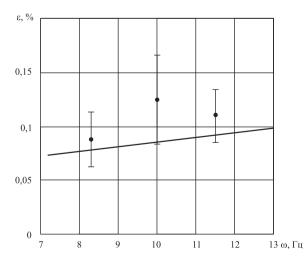


Рис. 3. Зависимость степени деформации поверхностного слоя от частоты вращения ω дна рабочей камеры при центробежно-ротационной обработке детали из стали 45

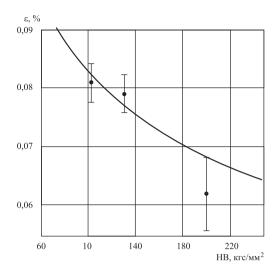


Рис. 4. Зависимость степени деформации поверхностного слоя от твёрдости материала по Бринеллю при вибрационной обработке

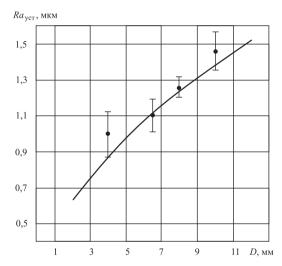


Рис. 5. Зависимость параметра установившейся шероховатости поверхности от диаметра шарика при центробежно-ротационной обработке деталей из коррозионностойкой стали 12X18H10T

остаточные напряжения, учитывая историю получения детали (технологическую наследственность), во многих случаях затруднительно из-за сложности физических и технологических процессов.

В настоящее время существует и широко используется значительное число методик экспериментального определения остаточных напряжений, большая часть из которых основана на послойном стравливании поверхностного слоя материала детали и измерении остаточных деформаций с последующим расчётом величины остаточных напряжений. Большинство данных методик являются довольно трудоёмкими и не позволяют оперативно оценить распределение остаточных напряжений в поверхностном слое обрабатываемых деталей.

Одним из перспективных направлений, позволяющим спрогнозировать знак и глубину залегания остаточных напряжений в поверхностном слое, является разработка расчётного аппарата решения инженерных задач с использованием технологий численного моделирования, который позволит сократить объём трудоёмких экспериментальных исследований. Для определения остаточных напряжений было проведено моделирование напряжённо-деформированного состояния очага деформации методом конечных элементов с помощью программного продукта ANSYS. Моделирование выполняли в несколько этапов: разработка геометрической модели детали, построение конечно-элементной схемы и подготовка исходных данных, выполнение расчёта, построение эпюр полей напряжений, обработка результатов.

Для оценки результатов исследований остаточных напряжений методом Давиденкова (рис. 6, 7) и методом конечных элементов с использованием пакета ANSYS (рис. 8) были проведены экспериментальные исследования остаточных напряжений.

При сравнении результатов экспериментальных исследований остаточных напряжений в поверхностном слое детали и результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования в системе ANSYS, были выявлены их незначительные расхождения — в пределах 5 %. Результаты исследований указывают на то, что использование метода конечных элементов для прогнозирования напряжённо-деформированного состояния поверхностного слоя деталей, обработанных динамическими методами ППД, даёт достаточно точный результат, а применение пакета ANSYS позволяет значительно уменьшить трудоёмкость расчёта величины и глубины проникновения остаточных напряжений.

Аналитический расчёт времени обработки — ещё одна важнейшая задача технолога, осуществляющего проектирование технологического процесса обработки детали. Время обработки детали играет значительную роль в процессе формирования качества поверхностного слоя при динамических методах ППД. При проектировании технологических процессов динамических методов обработки ППД важно определить рациональное временя обработки детали. При этом необходимо избегать таких явлений, как перенаклёп, который приводит к снижению прочности, отслаиванию, шелушению поверхностного слоя металла и появлению трещин в нём. Исходя из изложенного, перенаклёп способен негативно влиять на эксплуатационные свойства обрабатываемых деталей и уменьшать их долговечность. Перенаклёп является необратимым явлением, при котором невозможно восстановление качества поверхностного слоя металла, даже при использовании термообработки.

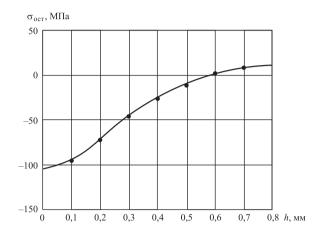


Рис. 6. Распределение остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ в поверхностном слое образцов после вибрационной обработки детали из латуни ЛС59-1:

h — расстояние от обрабатываемой поверхности

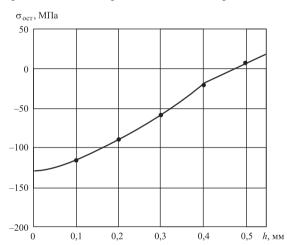


Рис. 7. Распределение остаточных напряжений $\sigma_{\rm ост}$ в поверхностном слое образцов после центробежно-ротационной обработки детали из сплава Д16

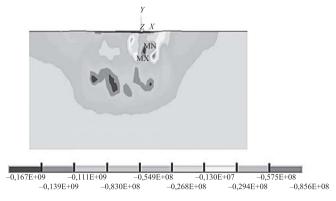


Рис. 8. Эпюра распределения остаточных напряжений после нескольких ударов шарика в одну точку для сплава Д16

Для обеспечения прогнозирования зультатов технологических процессов рассмотрим теоретическую модель определения времени обработки детали. Проанализируем процесс деформации поверхностного слоя детали глубиной h_{\max} . Вероятность P_1 события, что каждая точка поверхностного слоя детали толщиной h_{\max} попадёт в локальный деформированный объём за одно взаимодействие с индентором, можно определить, разделив деформируемый объём металла V при единичном взаимодействии шарика с обрабатываемой поверхностью (либо объёма V_s металла, заключенного в шаровой сегмент радиусом R и высотой h_{\max}) на объём слоя металла толщиной h_{max} и площадью, равной квадрату упаковки шариков на поверхности детали:

$$P_1 = \frac{V}{4R^2 h_{\max}}$$
 или $P_1 = \frac{V_s}{4R^2 h_{\max}}$.

Для теоретико-вероятностных расчётов числа актов деформирования, приходящихся на единицу объёма детали в единицу времени, для различных динамических методов обработки ППД введём переменную $f_{\rm B}$ — частоту соударений частиц с поверхностью детали. Вероятность события, что каждая точка поверхностного слоя детали толщиной $h_{\rm max}$ попадёт в локальный деформированный объём за одну секунду обработки,

$$P_1 = \frac{V_s}{4R^2h_{\text{max}}}f_{\text{B}}.$$

Время однократного деформирования всего объёма поверхностного слоя толщиной h_{\max}

$$t_1 = \frac{4R^2 h_{\text{max}}}{V_{\text{s}} f_{\text{R}}}.$$

Время многократного (F раз) деформирования всего объёма поверхностного слоя толщиной $h_{\rm max}$, соответственно, будет определяться как

$$t_F = \frac{4h_{\text{max}}FR^2}{V_{\text{s}}f_{\text{R}}},$$

где F — число повторяющихся ударов в одну и ту же точку обрабатываемой поверхности.

Согласно рекомендациям автора работы [3] выбор значения величины F при динамических методах обработки ППД зависит от твёрдости материала. Число повторяющихся ударов F варьируется от 10 до 20, большие значения назначаются для меньшей твёрдости материала обрабатываемой детали.

Учитывая, что превышение рационального времени обработки может привести к перенаклёпу обрабатываемой поверхности, провели экспериментальные исследования по определению времени перенаклёпа образцов из различных материалов в зависимости от режимов обработки и характеристик рабочих сред. Это в дальнейшем позволило выбирать такие технологические параметры динамических методов ППД, при которых требуемое время обработки гарантированно не достигало бы времени образования перенаклёпа.

Для формализации процедур при проектировании технологических процессов обработки динамическими методами ППД необходима разработка методики оптимизации технологических режимов и характеристик рабочих сред в целях получения наилучших эксплуатационных характеристик деталей, подвергнутых обработке. Следует отметить, что в исследованиях, проводимых ранее, оптимизацию технологических процессов осуществляли по критерию трудоёмкость [2, 4], что не позволяет в полной мере учитывать эксплуатационные характеристики обработанных деталей. При проведении настоящих исследований установлено, что для динамических методов ППД целесообразнее проводить оптимизацию по критериям максимальный предел выносливости и интенсивность деформаций, которые непосредственно влияют на долговечность детали. При этом необходимо предварительно проанализировать влияние технологических факторов, характерных для каждого рассматриваемого метода обработки, на основные результаты процесса обработки. Это позволяет провести ранжирование технологических факторов, выбрать из них наиболее существенные, а также принять решение, какие из технологических параметров и характеристик рабочих сред необходимо задавать массивом чисел, а какие — простым выбором по условиям технологической задачи.

Оптимальным режимом ППД, проводимого в целях упрочнения деталей, является тот, который позволит обеспечить максимальное приращение предела выносливости детали по сравнению с его исходным значением. В общем случае для материала детали с определённым набором физико-механических свойств предел выносливости зависит от следующих факторов: величины и распределения остаточных сжимающих напряжений в поверхностном слое детали после ППД, глубины упрочнённого слоя, степени деформации и параметра шероховатости поверхности. Имеющиеся зависимости для определения этих

величин не позволяют определить оптимальное физическое состояние поверхностного слоя. Это состояние формируется в процессе обработки детали и определяется конкурирующим влиянием двух протекающих параллельно процессов: физического упрочнения (наклёпа) и разрушения. По мере увеличения интенсивности деформации происходит рост предела текучести материала детали за счёт наклёпа. Наибольшая величина остаточных напряжений сжатия близка к достигнутому пределу текучести. Для усиления влияния благоприятных факторов нужно стремиться к максимальной интенсивности деформации поверхностного слоя. Однако при такой интенсивности увеличивается вероятность разупрочнения поверхностного слоя, поэтому необходимо обеспечить оптимальное значение интенсивности деформации, при котором приращение предела выносливости детали будет наибольшим.

Учитывая результаты работы [3], при описании деформационного упрочнения можно считать, что главная часть ресурса пластичности исчерпывается на стадии равномерной деформации, а за её пределами наблюдается значительный рост количества и размера микродефектов.

В работе [3] получена зависимость для нахождения равновесной интенсивности деформаций, которая определяет максимальный резерв использования физического упрочнения материала детали при обработке динамическими методами ППД,

$$\varepsilon_i = 2, 4 \left(\frac{h}{R}\right)^{2/3},$$

где h — глубина остаточной вмятины.

Для оптимизации технологических процессов обработки динамическими методами ППД в качестве целевой функции выбрана интенсивность деформации. Из большого числа вариантов сочетания технологических режимов и характеристик рабочих сред выбирается тот, который обеспечивает значение интенсивности деформации, наиболее близкое к равновесному. В качестве исходных данных, необходимых для начала расчёта, используются параметры исследуемого вида обработки динамического метода ППД. При выборе оптимального варианта используются ограничительные функции, в качестве которых могут выступать заданная глубина упрочнённого слоя, степень деформации или требуемые параметры шероховатости поверхности. Таким образом, при дальнейших технологических расчётах учитываются только такие варианты сочетания технологических режимов и характеристик рабочих сред, которые обеспечивают выполнение заданных ограничительных функций.

После того как были достигнуты заданные значения параметров качества поверхностного слоя, необходимо провести перебор и анализ показателей интенсивности деформации. Затем выбирается вариант технологического процесса, при котором достигается минимальная разница между равновесной и полученной интенсивностью деформаций. После проведённых расчётов на экран компьютера выводятся заданная глубина упрочнённого слоя и степень деформации, параметр шероховатости поверхностного слоя, интенсивность деформации и предельная равномерная деформация, параметры режима обработки.

На основании результатов представленной работы разработан программный блок для проектирования оптимальных технологических процессов динамических методов обработки ППД, который позволит учитывать этапы жизненного цикла изделия и будет способствовать широкому внедрению данных методов в современное машиностроение.

Библиографические ссылки

- 1. **ГОСТ 18296—72.** Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1972. 13 с.
- 2. **Тамаркин М.А.** Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: Дис. ... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 1995. 299 с.
- 3. **Шведова А.С.** Повышение эксплуатационных свойств деталей при обработке динамическими методами ППД. Дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д, 2016. 146 с.
- 4. **Разработка** САПР ТП обработки деталей ППД в гранулированных рабочих средах // М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, А.Г. Исаев и др. / Динамика технических систем: Сб. тр. XII Междунар. науч.-техн. конф., 2016. С. 317—321.
- 5. Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С., Исаев А.Г. Технологические основы оптимизации процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей в гранулированных рабочих средах // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 11 (131). С. 15—19.

Ссылка для цитирования

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С. Увеличение жизненного цикла изделий при обработке деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 403—408.

УДК 621.9.02

А.А. Дьяконов, д-р техн. наук, проф., **А.Е. Городкова** (Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск), **А.Н. Шульгин**

(АО «Радий», г. Касли Челябинской области)

shulgin alex@mail.ru

ЗАВИСИМОСТЬ КАЧЕСТВЕННЫХ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ ИЗ ФОЛЬГИРОВАННОГО СТЕКЛОТЕКСТОЛИТА ОТ СХЕМЫ ЗАТОЧКИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Статья посвящена обработке неоднородного композиционного материала, в состав которого входит стеклоткань, обладающая высоким абразивным действием. Рассмотрена геометрия заточки свёрл разных производителей. Приведены экспериментальные данные процесса сверления с необходимыми пояснениями.

Представлены основные характеристики композиционного материала, раскрыты особенности его механической обработки и возникающие в связи с этим трудности, распространённые ошибки, которые могут привести к массовому браку при изготовлении печатных узлов на производстве.

Ключевые слова: обработка стеклотекстолита; геометрия сверла; угол заточки; заусенец фольги; шероховатость стенок.

The article is devoted to the processing of non-uniform composite material, which has a high abrasive action of fiberglass. The geometry of the drills grinding from different manufacturers is considered. Experimental data of drilling process with necessary explanations are given. The main characteristics of the composite material are presented, the peculiarities of its machining and the difficulties that arise in connection with this, common mistakes that can lead to mass rejection in the manufacture of printed units in the production are revealed.

Keywords: processing of fiberglass; geometry of the drill; angle of sharpening; burr of the foil; roughness of the walls.

При конструировании радиоэлектронной аппаратуры и устройств промышленной автоматики особое внимание уделяется разработке печатных плат. Миниатюризация электрорадиоэлементов, применение интегральных микросхем и микросборок, высокая степень интеграции в процессе монтажа элементов приводят к повышению класса точности изготовления печатных узлов.

Технический уровень производства печатных плат на предприятии должен обеспечивать их изготовление с техническими характеристиками, соответствующими конструкторской документации. Категория конкурентного производства определяется значениями коэффициента технического уровня предприятия (КТУ) (табл. 1).

Как следует из табл. 1, чем выше значение КТУ, тем выше категория производства и тем более оно конкурентоспособно по сравнению с другими предприятиями той же отрасли [1].

Точность изготовления печатных узлов зависит от целого ряда технологических ха-

рактеристик и с практической точки зрения определяет базовые параметры элементов платы. Это относится в первую очередь к отклонениям диаметров отверстий и допускам на расположение осей отверстий.

Значения предельных отклонений диаметров монтажных и переходных отверстий в зависимости от класса точности печатной платы представлены в табл. 2 [2].

Значения позиционных допусков расположения осей отверстий приведены в табл. 3 [2].

Таким образом, тенденции современного мирового рынка электроники обусловливают

Таблица 1 **Категории конкурентного производства**

Категория производства	КТУ, баллы
1	Более 37
2	1236
3	Менее 12

Таблица 2 Предельные отклонения диаметра отверстия для разных классов точности

Диаметр		Предельное отклонение диаметра отверстия для класса точности						
отверстия, мм	^ — Наличие металлизании		2	3	4	5	6	7
Менее 0,3	Без металлизации	_	_	_	±0,02	±0,02	±0,02	±0,02
	С металлизацией без оплавления	_	_	_	-0,03	-0,03	±0,02	±0,02
	С металлизацией и оплавлением	_	_	_	-	_	_	_
0,31,0	Без металлизации	±0,10	±0,10	±0,05	±0,05	±0,05	±0,025	±0,02
	С металлизацией без оплавления С металлизацией и оплавлением		+0,05 -0,15	+0 -0,1	+0 -0,1	+0 -0,1	-0,025 -0,075	-0,02 -0,05
			+0,05 -0,18	+0 -0,13	+0 -0,13	+0 -0,13	_	_
Более 1,0	1,0 Без металлизации		±0,15	±0,10	±0,10	±0,10	±0,05	±0,03
	С металлизацией без оплавления	+0,10 -0,20	+0,10 -0,20	+0,05 -0,15	+0,05 -0,15	+0,05 -0,15	+0 -0,10	-0,02 -0,08
	С металлизацией и оплавлением		+0,10 -0,23	+0,05 -0,18	+0,05 -0,18	+0,05 -0,18	_	_

Таблица 3 Допуски на расположение осей отверстий для классов точности

Размер большей стороны	Позиционный допуск на расположение осей отверстий для класса точности						
печатной платы, мм	1	2	3	4	5	6	7
Менее 180	0,20	0,15	0,08	0,05	0,05	0,03	0,03
180360	0,25	0,20	0,10	0,08	0,08	0,05	0,05
Более 360	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,08	0,08

повышенные требования к уменьшению диаметров обрабатываемых отверстий, их предельных отклонений и допуска на расположение осей отверстий и увеличению их числа на плате.

В условиях реального производства при обработке отверстий нередко возникают дефекты вследствие использования режущего инструмента с искажённой геометрией, неправильной заточкой и затупленных свёрл. Основные виды дефектов и их причины представлены в табл. 4 [4].

Одним из направлений улучшения качества обработки отверстий является использование режущего инструмента с правильной геометрией [4].

При сверлении на настольных сверлильных станках применяют твёрдосплавные

Таблица 4 Основные дефекты при обработке отверстий

Вид дефекта	Причины
Большие заусенцы фольги на выходе сверла (более 40 мкм)	Затупленное сверло, искажённая геометрия сверла
Отслоение фольги от диэлектрика	Затупленное сверло
Ореолы (осветления) диэлектрика	Искажённая геометрия свер- ла, неправильно заточенное сверло
Поломка сверла	Несоответствие геометрии сверла требованиям стандарта

свёрла (ГОСТ 4010—77). Частота вращения шпинделя составляет 1000... 1900 об/мин. Сверление производят через кондуктор, укладывая заготовки плат пакетом толщиной до 4,5 мм. После сверления отверстия обрабатывают развёртками (ГОСТ 16086—70 или ГОСТ 1672—80). В соответствии с ГОСТ 23664—79 параметр шероховатости стенок отверстий не должен превышать 40 мкм [5].

В настоящее время на большинстве российских предприятий, занимающихся серийным производством печатных плат, сверление отверстий производится на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). Одним из наиболее

распространённых станков для обработки стеклотекстолита является многошпиндельный станок CM-600 (рис. 1).

Следует отметить, что операцию сверления при обработке стеклотекстолита выполняют с помощью твёрдосплавных свёрл по ГОСТ 17274—75 и ГОСТ 17275—75 (сплав марки ВК8 или ВК6М — смесь карбидов вольфрама 90...94 % и карбидов кобальта 5 %), а заготовки плат укладывают пакетом толщиной до 4,5 мм, подкладывая под нижнюю заготовку лист гетинакса толщиной 0,8...1,5 мм. Свёрла из углеродистой или легированных сталей совершенно непригодны, так как они затупляются после сверления нескольких отверстий [6].

Геометрия свёрл, выпускаемых отечественной промышленностью, показана на рис. 2.

Применяемый технологический процесс обработки накладывает ограничения на класс точности изготовления печатной платы [7].

Заточка зарубежных аналогов твёрдосплавных свёрл проводится по другой, более прогрессивной форме (рис. 3). Данный конструктив в сочетании с хорошо отшлифованными спиральными канавками создаёт больший объём для выхода стружки и облегчает её удаление из зоны резания.

На рис. 4 представлена геометрия заточки зарубежных свёрл. Наиболее оптимальный угол наклона винтовой линии 40°. Правильный угол наклона винтовой линии сверла облегчает выход стружки, обеспечивает отсутствие ореолов и осветлений диэлектрика, предотвращает поломку сверла.

На рис. 5 и 6 показаны геометрия и внешний вид типовых твёрдосплавных свёрл для обработки стеклотекстолита, на которых про-



Рис. 1. Четырёхшпиндельный станок СМ-600 для обработки стеклотекстолита

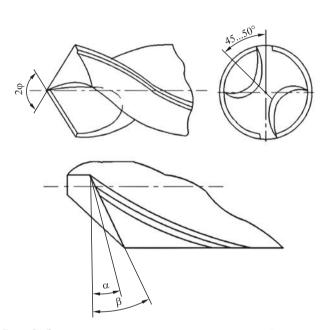


Рис. 2. Заточка отечественных спиральных свёрл: α — главный задний угол (15...17°); β — вспомогательный задний угол (30...32°); 2φ — угол при вершине (100...125°); угол наклона винтовой канавки — 40°

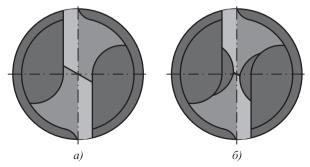


Рис. 3. Заточка зарубежных свёрл с дополнительным заострением вершины:

a — стандартная заточка сверла; δ — дополнительное заострение вершины сверла

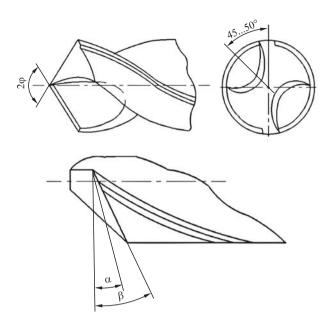


Рис. 4. Заточка зарубежных спиральных свёрл: α — главный задний угол (20°); β — вспомогательный задний угол (25°); угол при вершине — 110°; угол наклона винтовой канавки — 40°

водился эксперимент по проверке влияния заточки режущего инструмента на его стойкость.

Эксперимент проводился на стеклотекстолите марки FR-4 (Германия). Обработка материала выполнялась твёрдосплавными свёрлами двух разных производителей. Вид обрабатываемой заготовки представлен на рис. 7.

В табл. 5 приведены результаты эксперимента и фотографии обработанных отверстий свёрлами с разной геометрией заточки. Всего в ходе эксперимента обработано 480 заготовок. Порядок выбора режимов резания приведён в статье [8].

Проведённый эксперимент показал, что геометрия сверла и правильная прогрессивная заточка напрямую влияют на износ сверла, качество обработки материала и производительность изготовления изделий.

Стойкость свёрл, произведённых в Германии, в 2,44 раза выше, чем отечественных на тех же режимах резания при обработке одного и того же материала. Это означает, что при использовании таких свёрл сократятся время на переналадку оборудования и трудоёмкость переточки свёрл.

Проведённые эксперименты показывают, что геометрия сверла оказывает большое влияние на его стойкость и качество обрабатываемых деталей: качество стенок отверстий; размеры заусенцев на входе и выходе инструмента; уход и поломки сверла; эксплуатаци-

онные свойства, число переточек и долговечность сверла.

Кроме того, использование свёрл с прогрессивной заточкой позволяет исключить некоторые операции механической подготовки поверхности заготовок.

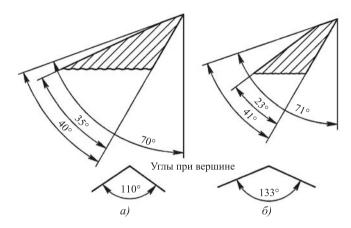


Рис. 5. Геометрия свёрл: a — производства России; δ — производства Германии



Рис. 6. Внешний вид твёрдосплавных свёрл

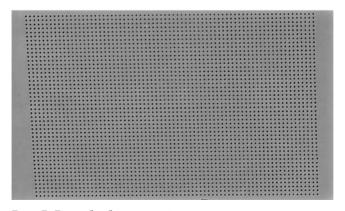


Рис. 7. Вид обрабатываемой заготовки

Таблица 5

Результаты экспериментальных исследований

Режим сверления	Тип сверла, число отверстий, наличие заусенцев	Износ инструмента, наличие заусенцев в отверстии	Внешний вид отверстий
n = 48 000 об/мин, F = 1100 мм/мин	Сверло (Россия) — 8600 отв., заусенец — 30 мкм		
	Сверло (Германия) — 21 000 отв., заусенец — 30 мкм		

Работы проводились на предприятии АО «Радий» при переходе на линейку импортных твёрдосплавных свёрл. По их результатам была перестроена схема заточки режущего инструмента, введены корректирующие поправки в настройку заточного станка и переточен весь задел свёрл, в том числе свёрл, произведённых в России. Методика заточки свёрл оформлена в виде руководящей инструкции. В инструкцию вошли методика и геометрия заточки режущего инструмента, а также рекомендации по выбору правильных режимов резания в зависимости от диаметра используемого сверла.

Внедрение руководящей инструкции и дальнейшая корректировка технологической документации позволили повысить производительность труда на 20 % за счёт снижения числа переналадок оборудования и трудоёмкости переточки свёрл.

Библиографические ссылки

1. **ГОСТ Р 53432—2009.** Платы печатные. Общие технические требования к производству. М.: Стандартинформ, 2010. 15 с.

- 2. **ГОСТ Р 53429—2009.** Платы печатные. Основные параметры конструкции. М.: Стандартинформ, 2010. 8 с.
- 3. **Ильин В.А.** Технология изготовления печатных плат. Л.: Машиностроение, 1984. 77 с.
- 4. **Lobanov D.V., Yanyushkin A.S.** Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composite // Russian Engineering Research. 2011. No. 3. P. 236—239.
- 5. **Пирогова Е.В.** Проектирование и технология печатных плат. М.: ИНФРА-М, 2005. 560 с.
- 6. Махмудов М. Механическая обработка печатных плат. М.: Радио и связь, 1986. 72 с.
- 7. **Лунд П.** Прецизионные печатные платы. Конструирование и производство. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
- 8. **Шульгин А.Н., Орлов А.А.** Зависимость качественных и количественных показателей обработки отверстий на печатных платах от выбора фольгированного стеклотекстолита и режимов резания // Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение. 2015. № 2. С. 32—39.

Ссылка для цитирования

Дьяконов А.А., Городкова А.Е., Шульгин А.Н. Зависимость качественных и количественных показателей обработки отверстий на печатных платах из фольгированного стеклотекстолита от схемы заточки режущего инструмента // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 409—413.

团

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 681.5.09

Д.С. Обычайко, В.А. Шихин, канд. техн. наук, доц.

(Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт») d.obychaiko@aamautomatic.ru

МЕТОДИКА ФОРМАЛИЗАЦИИ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА НАДЁЖНОСТИ

Предлагается решение по формализованному представлению физических компонентов и кибер-компонентов в составе киберфизических систем (КФС), позволяющее реализовывать вычислительные процедуры по расчёту показателей надёжности многокомпонентных промышленных систем в условиях длительной интенсивной эксплуатации. Оценка надёжности КФС проводится с применением искусственных нейронных сетей (ИНС) по выбранным показателям. В этих целях проводится расчёт в качестве выходов полученной интегрированной модели КФС + ИНС следующих факторов: коэффициента конфликтности оборудования, коэффициента полноты информации, коэффициента готовности, а также коэффициента активности оператора, который является важным показателем возможности функционирования системы в полностью автоматическом режиме. Обучение ИНС проводится по доступным историческим данным о состояниях физических компонентов и киберкомпонентов в составе КФС, а также на основе знаний экспертов. В качестве демонстрационного примера КФС рассмотрена цифровая электрическая подстанция, что позволяет представить предлагаемый подход в ясной и удобной для понимания форме.

Ключевые слова: киберфизическая система; анализ надёжности; искусственная нейронная сеть; цифровая подстанция.

A solution is proposed for the formalized representation of physical components and cyber components in the structure of cyberphysical systems (CPhS), what allows to realize computational procedures for calculating the reliability indices of multicomponent industrial systems under conditions of prolonged intensive operation. Evaluation of the reliability of the CPhS is carried out through the use of artificial neural networks (ANN) for selected indicators. For these purposes, the following factors are calculated as outputs of the integrated model CPhS + ANN: the equipment collision factor, the information completeness factor, the availability factor and the operator activity coefficient, which is an important indicator of the possibility of the system functioning in a fully automatic mode. Training ANN is conducted on accessible historical data on the states of physical components and cyber components within the CPhS, as well as on the basis of expert knowledge. As a demonstration example of CPhS, a digital electrical substation is presented, which makes it possible to present the proposed approach in a clear and easy-to-understand form.

Keywords: cyberphysical system; reliability analysis; artificial neural network; digital substation.

Введение. Многообразие киберфизических систем и весьма широкий диапазон задач по их исследованию существенно затрудняют разработку унифицированного подхода к математической формализации таких систем. Киберфизические системы (КФС), или Cyber-Physical Systems (CPS), [1] — это системы, где вычислительные и коммуникационные компоненты, такие как интеллектуальные датчики, цифровые измерительные средства и приборы, активные устройства сбора данных и обмена данными и другие интеллектуальные устройства, интегрированы в объекты и системы управления и непосредственно взаимодействуют с их физическими (техническими) компонентами, а обмен данными и передача сигналов между отдельны-

ми устройствами осуществляются в виде пакетов данных и информации. Часто при этом имеют место большие расстояния между различными компонентами системы и используются разнородные физические каналы передачи информации с необходимостью её дополнительного преобразования и кодирования [2].

В КФС имеет место комплексная интеграция процессов вычислений с физическими процессами. Встроенные компьютеры и сети контролируют физические процессы.

Под физическими компонентами (ФК) будем понимать технические устройства первичного оборудования, которые используются в технологическом процессе и управляются с помощью аналоговых сигналов.

Под кибернетическими компонентами (КК) будем понимать интеллектуальные и электронно-вычислительные устройства, которые обеспечивают сбор, обработку и передачу информации в цифровом виде от физических компонент в центр управления системой либо обеспечивают информационное взаимодействие физических компонентов.

В электроэнергетике КФС, в частности, позволяют применять интеллектуальные технологии и программно-технические средства автоматизированного мониторинга и диагностики состояния первичного силового оборудования. В этом случае киберкомпоненты включают в себя высокочувствительные сенсоры, экспертные диагностические самообучающиеся системы. В качестве типового примера КФС можно рассматривать цифровую подстанцию (ЦПС) [3], включающую первичное и вторичное оборудование, устройства сопряжения, программное обеспечение и др. При этом можно осуществлять интеллектуальное управление конечным электропотреблением в режиме реального времени на основе интеграции электрических и информационных сетей.

Суть предлагаемого подхода к формализации представления физических компонентов и киберкомпонентов. Поскольку КФС можно рассматривать как информационно-технологическую интеграцию вычислительных ресурсов и физических процессов, то предлагается обобщить архитектуру КФС в виде схемы, представленной на рис. 1.

Архитектура, представленная на рис. 1, включает в себя:

набор взаимосвязанных физических компонентов, реализующих технологический процесс;

кибернетическую среду, обеспечивающую обмен информацией внутри системы и с окружающей средой и передачу управляющих команд через программируемые логические контроллеры (ПЛК) к исполнительным механизмам:

набор взаимосвязанных информационных компонентов, осуществляющих управление процессами с разной степенью автоматизации.

В рамках предложенной архитектуры ФК (сенсоры, оборудование и др.) взаимодействуют друг с другом, а также с КК с помощью стандартных протоколов обмена данными, измерениями и управлениями (ТУ, ТИ, ТС). Например, по отношению к такому объекту, как ЦПС [3], используются стандартные протоколы обмена данными в соответствии со стандартом МЭК 61850 (IEC 61850) [4].

Отличительные признаки КФС:

высокая степень компьютеризации системы, постоянный телекоммуникационный контакт (обмен информацией) с аналогичными системами и взаимодействие с глобальной сетью Internet;

наличие центра (подсистемы) автоматического управления функционированием системы и обеспечение её устойчивой работоспособности при наличии различных возмущающих воздействий;

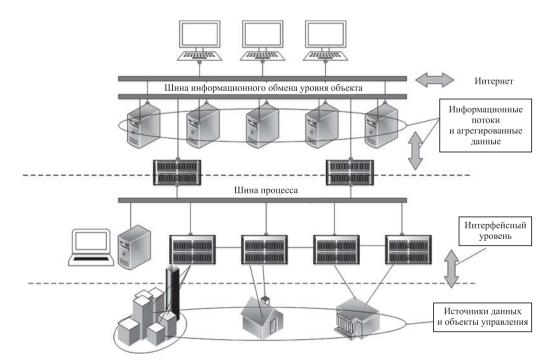


Рис. 1. Пример обобщённой архитектуры КФС

наличие единой информационной среды, или киберпространства, представляющего собой совокупность программно-аппаратных средств обработки и передачи информации, обмен внутри системы и с окружающей средой, системы автоматического управления физическими компонентами с помощью ПЛК и поддержания заданного сценария работы с возможностью адаптивного управления, а также средства обеспечения защиты информации в виде криптосерверов, межсетевых экранов, антивирусов и т. д.;

интеллектуализация управления путём построения сценариев работы на основе автопрогноза и адаптационного управления, что обеспечивает устойчивость и эффективность функционирования КФС.

В задачах анализа надёжности КФС предлагается использовать следующее унифицированное описание её компонентов.

 Φ К представляется в виде блока, приведённого на рис. 2, где вектор $PCP = [p_1, p_2, ..., p_n]^T$ есть вектор вероятностей состояний Φ К.

КК представляется в виде блока, приведённого на рис. 3, где матрица *ССР* есть матрица вероятности состояний КК с учётом кибернетических поправок. Под кибернетической поправкой будем понимать изменяющийся во времени фактор, влияющий на состояние КК и связанный со спецификой функционирования кажлой КК:

 $t = [\tau_1, \ \tau_2, \ ..., \ \tau_m]$ — кибернетическая поправка, отражающая временную недоступность киберустройства из-за конфликта пакетов данных;

 $t = [e_1, e_2, ..., e_m]$ — кибернетическая поправка, отражающая наличие ошибки в пакетах передачи данных. В сетях передачи информации (сигналов, пакетов данных) могут иметь место значительные задержки из-за влияния электромагнитных помех, присущих средам с высоким напряжением, и радиочастотных помех [5];

 $v = [v_1, v_2, ..., v_m]$ — кибернетическая поправка, связанная с превышением по объёму передаваемых данных.

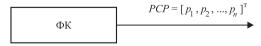


Рис. 2. Формализованное представление физического компонента КФС при анализе надёжности

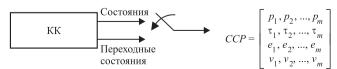


Рис. 3. Формализованное представление кибернетического компонента КФС при анализе надёжности

Отличительные особенности оценки надёжности КФС. Одними из основных показателей при оценке работоспособности КФС являются уровни надёжности и безопасности. При этом необходимо принимать во внимание, что в КФС имеет место непредвиденное поведение киберкомпонентов. Кроме того, состояние окружающей среды в общем случае слабо предсказуемо. Поэтому КФС должны быть способны продолжать работу в непредвиденных обстоятельствах и оперативно адаптироваться к новым условиям работы, а также самовосстанавливаться в случае сбоев. Важно отметить, что использование сетевых и вычислительных устройств предоставляет возможности для организации направленных кибератак на КФС [6]. Всё это повышает необходимость и актуальность исследования факторов живучести КФС и надёжности их эксплуатации.

Особенность КФС заключается в том, что КК в процессе эксплуатации системы в отличие от ФК могут находиться в m > n состояниях. Например, в силу наличия указанных выше кибернетических поправок $e_1...e_m$ (см. рис. 3) появляется состояние задержки КК, характеризующееся тем, что, хотя устройство не выходит из строя физически, но передача сигнала или пакета информации задерживается на время выше порогового значения. Соответственно, это отражается на работе других элементов системы, как ФК, так и КК, связанных с проблемным устройством КК.

Например, в процессе эксплуатации локальной вычислительной сети на её функционировании могут отражаться различные события и конфликты: ожидание начала сеанса передачи информации — это связано с тем, что в сети не может происходить несколько передач одновременно; задержка узловой обработки — время, необходимое для чтения заголовка пакета и определения дальнейшего маршрута, и др. В эти моменты электронное устройство КК можно лишь условно считать работоспособным.

В последнее время появились работы, предлагающие различные методики расчёта надёжности отдельных КК, а также предпринята попытка проектного расчёта надёжности интегрированной КФС на основе введения киберфизической матрицы [7]. Однако практически все попытки подойти к решению указанной проблемы расчёта надёжности КФС остаются в рамках классических статистических подходов.

Таким образом, расчёт показателей надёжности систем указанного класса требует учёта специфики состояния как кибернетических, так и физических компонентов, а расчёт про-

ектной надёжности таких систем на этапе технического и рабочего проектирования может рассматриваться лишь как способ получения предварительной и весьма грубой оценки показателей надёжности.

Модель оценки живучести и надёжности КФС на примере объекта цифровая электроподстанция. Предлагаемый подход рассматривается на примере цифровой электроподстанции, представляющей собой наглядный пример реальной киберфизической системы (КФС-ЦПС).

Цифровая подстанция [3] — это подстанция с высоким уровнем автоматизации управления технологическими процессами (АСУ ТП), релейной защиты и автоматики (РЗА), противоаварийной автоматики (ПА), автоматизированной информационно-измерительной системой коммерческого учёта электроэнергии (АИИС КУЭ), регистрации аварийных событий (РАС), определения места повреждения (ОМП), сети сбора и передачи информации (ССПИ) и др., в которой все процессы информационного обмена между её элементами, информационного обмена с внешними системами, а также управления работой подстанции осуществляются в цифровом виде на основе

протоколов Международной электротехнической комиссии (МЭК) [4]. При этом и первичное силовое оборудование ЦПС, и компоненты информационно-технологических и управляющих систем должны быть функционально и конструктивно ориентированы на поддержку цифрового обмена данными.

ЦПС, как любая КФС, состоит из физических компонентов, таких как силовые трансформаторы, разъединители, коммутационные аппараты, ограничители перенапряжений (ОПН), линии электропередач (ЛЭП) и т. д., и кибернетических компонентов, таких как мультиплексоры (Merging Units), выносные устройства связи с объектом (УСО), различные интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ, или Intelligent Electronic Devices — IED), шина процесса (Process Bus), шина станции (Station Bus), цифровые измерительные трансформаторы, Ethernet-коммутаторы и др.

Обобщённая схема ЦПС приведена на рис. 4. Для более наглядного представления КК в составе системы на рис. 4 имеют фон, а ФК изображены без фона.

На полевом уровне данные о положении коммутационных аппаратов и другая дис-

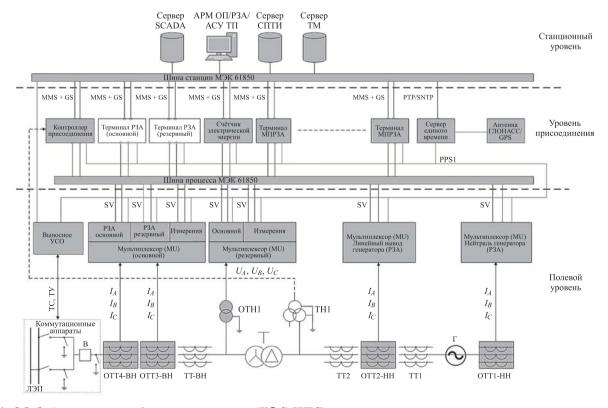


Рис. 4. Обобщённая схема цифровой подстанции (КФС-ЦПС):

АРМ ОП — АРМ оператора; сервер ТМ — сервер единого времени; ТС — телесигнал; ТУ — телеуправление; ОТТ-ВН — оптический трансформатор тока (высокое напряжение); ОТТ-НН — оптический трансформатор тока (низкое напряжение); ОТН — оптический трансформатор напряжения; ТТ-ВН — трансформатор тока (высокое напряжение); ТН — трансформатор напряжения; $I_{\rm A}$, $I_{\rm B}$, $I_{\rm C}$ — токи; $U_{\rm A}$, $U_{\rm B}$, $U_{\rm C}$ — напряжения; В — блок аналоговых и многоразрядных преобразователей и датчиков; Γ — генератор переменного тока

кретная информация (положение ключей режима управления, состояние цепей обогрева приводов и др.) собираются с использованием выносных модулей УСО, установленных в непосредственной близости от коммутационных аппаратов. Выносные модули УСО имеют релейные выходы для управления коммутационными аппаратами и синхронизируются с точностью не ниже 1 мс. Передача данных от выносных модулей УСО осуществляется по станционной шине в виде GOOSE-сообшений на уровень присоединения. Управление коммутационными аппаратами осуществляется путём передачи команды по цифровым протоколам (в виде сообщений GOOSE) от контроллера присоединения к модулям УСО. Аналогично работают терминалы РЗА на отключение выключателей. Опифрованные данные измерений передаются в коммутаторы шины процесса в виде сообщений Sampled Values (SV) [8]. Данные от цифровых измерительных трансформаторов (оптических и электронных) с помощью мультиплексоров (Merging Units) преобразуются к виду широковещательных Ethernet-пакетов (в соответствии со стандартом МЭК 61850—9) и передаются по сети Ethernet (через шину процесса) в устройства на уровне присоединений (контроллеры АСУ ТП, РЗА, ПА и др.).

Уровень присоединений включает в себя различные интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ, IEDs), которые получают информацию от устройств полевого уровня, выполняют логическую обработку информации, передают управляющие воздействия через устройства полевого уровня на первичное оборудование, а также осуществляют передачу информации на станционный уровень. К устройствам типа ИЭУ относятся контроллеры присоединения, терминалы микропроцессорных устройств релейной защиты (МПРЗА) и другие многофункциональные микропроцессорные устройства.

Станционный уровень включает в себя серверы верхнего уровня (сервер базы данных, сервер SCADA, сервер сбора и передачи технологической информации), автоматизированные рабочие места (APM) персонала подстанции. На станционный уровень поступает информация от ИЭУ. Станционный уровень обеспечивает сбор, обработку, хранение и ретрансляцию полученной информации по резервированным каналам связи в диспетчерский центр управления сетями ЦУС и в региональное диспетчерское управление (РДУ). АРМ персонала ЦПС позволяют осуществлять отображение информации в виде, удоб-

ном для ситуационного анализа и принятия решений по управлению.

Для обеспечения синхронизации функционирования всех устройств на ЦПС организуется система единого времени (сервер ТМ). Она включает в себя программные и технические средства, обеспечивающие приём сигналов точного времени от внешнего источника GPS/ГЛОНАСС. Система состоит из сервера точного времени (сервер ТМ, см. рис. 4) и устройства распределения сигналов синхронизации секундной метки (1PPS — 1 импульс в секунду).

Шина процесса и станционная шина выполнены в виде оптического кольца. Для комплекса ЦПС важнейшими элементами являются сети передачи данных — шина процесса и станционная шина. На их надёжность могут влиять следующие факторы: нарушение синхронизации с сервером единого времени, потеря питания цифровых трансформаторов тока и напряжения, обрыв оптического кабеля, неисправность серверо коммутатора, нарушение подачи дублирующего потока SV, неисправность вторичных цепей трансформатора напряжения.

Ставится задача исследовать работоспособность многофункциональной и многокомпонентной КФС-ЦПС по выбранным, на основе экспертных знаний, показателям живучести и надёжности с использованием формализации физических и кибернетических компонентов и включением в расчётный алгоритм интегрированной процедуры, позволяющей КФС-ЦПС гибко адаптироваться в масштабе реального времени как к постоянно изменяющимся параметрам исследуемой системы, так и к условиям её работы.

Для каждого устройства, изображённого на рис. 4, определены следующие параметры: тип входного и выходного сигнала;

состояния, в которых устройство может находиться на этапе эксплуатации системы;

вероятности нахождения в указанных выше состояниях.

Возможные состояния некоторых элементов КФС-ЦПС и значения соответствующих вероятностей (на основе исторических данных и экспертных оценок) приведены в табл. 1.

В качестве основных показателей живучести и надёжности системы КФС-ЦПС выбрано четыре показателя:

 K_{Γ} — коэффициент готовности [9] — вероятность того, что система работоспособна в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых применение системы по назначению не предусматривается;

Таблица 1 Состояния некоторых элементов системы КФС-ЦПС и вероятность нахождения в этих состояниях

Элемент	Состояния	Вероятность нахождения в состоянии
	Физические компоненты	
Силовой	Исправная работа	0,95
трансформатор (РТТ)	Повреждение изоляции корпуса	0,01
	Повреждение магнитопровода	0,02
	Повреждение обмоток	0,02
	Обрывы	0,01
	Ухудшение изоляции проводников, создающее межвитковые замыкания	0,03
	Механические износы контактов и выводов	0,01
Разъединители (PDI)	Исправная работа	0,96
	Повреждение в механической и электрической частях	0,02
	Чрезмерный нагрев контактов	0,01
	Пригорание контактов	0,01
Выключатель (РСВ)	Сработал	0,88
	Не сработал	0,12
Комплектное	Исправная работа	0,93
распределительное	Нарушено плавное перемещение шторок	0,03
устройство (PCRU)	Дефект опорного или проходного изолятора (трещина, скол и т. п.)	0,04
Воздушные ЛЭП (PVL)	Стабильная работа воздушной линии (ВЛ)	0,95
	Повреждение ВЛ из-за отказа изоляторов	0,04
	Повреждение ВЛ из-за агрессивных условий окружающей среды	0,10
Силовые кабельные	Есть питание	0,90
линии (РРС)	Нет питания	0,05
(Питание пропадает	0,05
	Кибернетические компоненты	
Цифровой	Исправная работа	0,97
трансформатор (CDT)	Задержка обработки сигнала выше допустимого порога	0,02
	Выход из строя	0,01
Мультиплексор (CMU)	Стабильный приём показаний, преобразование данных и их передача	0,95
	Задержка в передаче данных из-за большого времени обработки	0,02
	Передача неполного пакета по сети	0,02
	Отсутствие показаний	0,01
Контроллер	Стабильный приём показаний, преобразование данных и их передача	0,94
присоединения (ССЈ)	Задержка в передаче данных из-за большого времени обработки	0,02
	Передача неполного пакета по сети	0,02
	Отсутствие показаний	0,02
Контроллер полевого	Стабильный приём показаний, преобразование данных и их передача	0,94
уровня (ССР)	Задержка в передаче данных из-за большого времени обработки	0,02
	Передача неполного пакета по сети	0,02
	Отсутствие показаний	0,02
Шина процесса (СРВ)	Передача пакета без потери информации в сети	0,97
	Передача пакета с потерей информации в сети	0,02
	Отсутствие пакета в сети	0,01
Шина станции (CSB)	Передача пакета без потери информации в сети	0,97
. , ,	Ошибка в приёме пакета данных	0,02
	Отсутствие пакета в сети	0,01

 $K_{\Pi M}$ — коэффициент полноты информации (показатель полноты информации, которую предоставляет система);

 $K_{\rm K}$ — коэффициент конфликтности оборудования (показатель степени конфликтных ситуаций между КК системы);

 $K_{\rm AO}$ — коэффициент активности оператора (показатель степени необходимости вмешательства оператора в работу системы).

Типовые значения этих коэффициентов определены на основании технических требований заказчиков систем ЦПС и представлены в табл. 2.

Для оценки реальных значений показателей, приведённых в табл. 2 для КФС-ЦПС, находящейся на этапе активной эксплуатации, предлагается использовать аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) [10]. Использование нейронных сетей обеспечивает отображение входной информации в выход-

Таблица 2 Значения основных показателей живучести системы КФС-ЦПС

Коэф- фици- ент	Значение коэффи- циента	Описание состояния системы при данном значении коэффициента
K_{Γ}	0,90,97	Высокий уровень надёжности системы
	0,70,9	Средний уровень надёжности системы
	< 0,7	Низкий уровень надёжности системы
$K_{\Pi H}$	00,4	Информация о работе системы практически отсутствует
	0,40,8	Информация о работе системы имеется в небольшом количестве
	0,80,99	Информации о работе системы достаточно для стабильной работы, но есть небольшие потери
	1	Нет потерь информации о работе системы
K_{K}	0	Нет конфликта
	0,2	Низкий уровень конфликтности
	0,6	Средний уровень конфликтности
	1	Высокий уровень конфликтности
K_{AO}	0	Вмешательство оператора не требуется
	0,5	Требуется вмешательство оператора в работу системы на программном уровне
	1	Требуется вмешательство оператора в работу системы на программно-аппаратном уровне

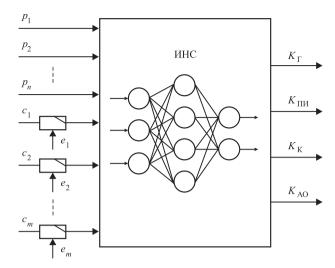


Рис. 5. Структура разрабатываемой ИНС

ную с учётом масштабируемости и адаптивности модели к учёту накопленных исторических данных и опыта экспертов. Кроме того, выбор аппарата ИНС для оценки показателей живучести КФС-ЦПС главным образом обусловлен их способностью адаптироваться к изменениям параметров системы в режиме реального времени. В частности, нейронные сети, обученные действовать в определённой среде, могут быть легко переучены для работы в условиях изменения параметров этой среды.

Структура разработанной модели ИНС приведена на рис. 5. Каждый компонент КФС может характеризоваться несколькими состояниями и определённой вероятностью нахождения в этих состояниях. Число состояний может быть разным для разных компонентов. На вход ИНС поступают значения вероятностей нахождения каждого компонента в конкретном состоянии (p_i — значения вероятности нахождения i-го ФК в текущем состоянии ($i = \overline{1, n}$); c_j — значения вероятности нахождения j-го КК в текущем состоянии ($j = \overline{1, m}$); e_j — кибернетическая поправка для j-го КК ($j = \overline{1, m}$)). На выходе сети получаем значения четырёх показателей живучести.

Выводы

- 1. Предложенное унифицированное представление кибернетических и физических компонентов КФС на основе введённых состояний элементов и значений соответствующих вероятностей позволяет формализовать структуру КФС и свести её к виду, удобному для решения задач исследования живучести и эксплуатационной надёжности.
- 2. Использование аппарата искусственных нейронных сетей в качестве интегрированной

расчётной модели в составе КФС-ИНС для оценки показателей живучести и надёжности позволяет реализовать механизм адаптации к изменениям параметров исследуемой системы в режиме реального времени протекания процессов.

3. Предложенные в работе подходы и решения протестированы на примере цифровой электроподстанции. Приведённая формализация физических и кибернетических компонентов ЦПС под решение задач исследования живучести и надёжности КФС-ЦПС позволила построить модель для расчёта и прогнозирования основных показателей работоспособности для указанной многокомпонентной динамической системы.

Библиографические ссылки

- 1. **Antsaklis P.** Goals and challenges in cyber-physical system research // IEEE Transactions on Automatic Control. 2014. Vol. 59. No. 12. P. 2017—2019.
- 2. **Fei Hu, Yu Lu, Vasilakos A.V.** et al. Robust Cyber-Physical Systems: Concept, models, and implementation // Future generation computer systems. 2016. Vol. 56. P. 449—475.
- 3. **Чичёв С.И., Калинин В.Ф., Глинкин Е.И.** Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий. М.: Спектр, 2014. 228 с.

- 4. **ГОСТ Р МЭК 61850-5—2011.** Сети и системы связи на подстанциях. Ч. 5. Требования к связи для функций и моделей устройств. М.: Изд-во стандартов, 2013. 130 с.
- 5. Yu Zhang, Fei Xie, Dong Y., Yang G., Zhou X. High Fidelity Virtualization of Cyber-Physical systems // Intern. J. of modeling, simulation, and scientific computing. 2013. Vol. 4. 26 p.
- 6. **Yilin Mo, Bruno Sinopoli.** On the Performance Degradation of Cyber-Physical Systems Under Stealthy Integrity Attacks // IEEE Transactions on Automatic Control. 2016. Vol. 61. No. 9. P. 2618—2624.
- 7. **Lei H., Sigh C., Sprintson A.** Reliability modeling and analysis of IEC 61850 based substation protection systems // IEEE Transactions on Smart Grid. 2014. Vol. 5. No. 5. P. 2194—2202.
- 8. **Дроздова Т.В., Елов Н.Е., Морозов А.П.** «Цифровая подстанция»: практический опыт. Первое в России внедрение технологий на действующем объекте генерации // Энергия единой сети. 2016. № 3. С. 51—57.
- 9. **Мубаракшин Ф.Х.** Надёжность в электроэнергетике. Ч. 1. Челябинск, ЧПИ, 1977. 81 с.
- 10. **Хайкин С**. Нейронные сети. Полный курс. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. M.: Вильямс, 2006. 1104 с.

Ссылка для цитирования

Обычайко Д.С., Шихин В.А. Методика формализации киберфизических систем в задачах анализа надёжности // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 414—421.

УДК 681.5.015

Ю.И. Мышляев, канд. техн. наук, **Нгуен Ти Тхань, А.В. Финошин** (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал) nct1101@gmail.com

НЕПРЯМОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАСКАДНЫМИ СИСТЕМАМИ С ИНТЕГРАЛЬНЫМ ВИРТУАЛЬНЫМ АЛГОРИТМОМ

Рассмотрена методика адаптивного управления каскадными системами на основе интегрального виртуального управления и метода скоростного биградиента. Предложенные алгоритмы обеспечивают высокое качество управления за счёт повышения астатизма выходного каскада и робастных свойств по отношению к аддитивным и мультипликативным возмущениям.

Ключевые слова: интегральное управление; метод скоростного биградиента; линейная каскадная система; адаптивное управление; функция Ляпунова.

The adaptive control methodology of cascade systems on the basis of integral virtual control and the method of high-speed bigradient is considered. The proposed algorithms provide a high quality control due to increased output stage astaticism and robust properties with respect to additive and multiplicative perturbations.

Keywords: integral control; method of high-speed bigradient; linear cascade system; adaptive management; function of Lyapunov.

Введение. В статье рассматривается методика адаптивного управления каскадными системами с целевой функцией, зависящей от

фазовых переменных выходного каскада. Для упрощения процедуры синтеза управления каскадными системами и уменьшения слож-

ности алгоритмов управления и адаптации применяется двухэтапная процедура синтеза: сначала выбирается виртуальное управление выходным каскадом, затем синтезируется управление всей системой, гарантирующее минимизацию невязки между выходом входного каскада и виртуальным управлением. Подобная идея лежит в основе бэкстеппинга [1] и скользящих режимов [2]. В условиях параметрической неопределённости дополнительно синтезируется контур адаптации. В основе рассматриваемой методики синтеза управления каскадными системами лежит метод скоростного биградиента (МСБГ) [3].

В представленной работе предлагается подход, позволяющий повысить качество управления путём увеличения астатизма выходного каскада. В основе предлагаемого подхода к синтезу виртуального управления лежат методики интегрального управления и непрямого адаптивного управления с настраиваемой моделью.

Интегральное управление позволяет достичь цель в условиях параметрической неопределённости, что объясняет популярность в промышленном применении ПИ- и ПИДрегуляторов [4]. Методика адаптивного управления с неявной эталонной моделью (НЭМ) [5] А.Л. Фрадкова включает формирование информационного выхода в виде линейной комбинации выхода и его производных, обеспечивающего выполнение условия пассивируемости. Управление выбирается в виде обратной связи по информационному выходу.

В отличие от методики управления с НЭМ [5] в данной работе используется каскадный синтез, проводится расширение размерности выходного каскада путём добавления интегратора и для синтеза контура адаптации используется непрямое адаптивное управление с настраиваемой моделью. В отличие от скользящих режимов высших порядков [6] происходит расширение размерности не входного каскада, а выходного. В отличие от МСБГ [3] синтезируется виртуальное управление на основе идей интегрального управления. В отличие от гладких алгоритмов виртуального управления по состоянию повышается астатизм выходного каскада и обеспечиваются робастные свойства по отношению к аддитивным возмущениям и параметрической неопределённости [4].

В статье приводится один из подходов к синтезу на основе интегрального управления, формируются и доказываются теоремы

о достижении системой цели управления. Представлены пример применения методики для синтеза алгоритма слежения для линейной каскадной системы и результаты компьютерного моделирования.

Постановка задачи. Рассматривается линейная каскадная модель объекта управления (ОУ)

$$S_1:\dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_{11}(\xi)\mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_{12}(\xi)\mathbf{x}_2,$$
 (1)

$$S_2:\dot{x}_2 = \mathbf{a}_{21}^{\mathrm{T}}(\xi)\mathbf{x}_1 + a_{22}(\xi)x_2 + b_2(\xi)u, \qquad (2)$$

где $\mathbf{x}_1 = (x_{11} \ x_{12} \ \dots \ x_{1n})^{\mathrm{T}} \in R^n$ — вектор состояния выходного каскада $S_1; \ x_2 \in R^1$ — фазовая координата входного каскада $S_2; \ \mathbf{x} = (\mathbf{x}_1^{\mathrm{T}}, x_2)^{\mathrm{T}};$ $u \in R^1$ — управление; $\mathbf{A}_{11}(\xi) = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{I}_{n-1} \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix};$ $\mathbf{a}_{12}(\xi) = (0 \ \dots \ 0 \ a_n)^{\mathrm{T}}; \ \mathbf{a}_{21}(\xi)$ — вектор $(n \times 1);$ $a_{22}(\xi), \ b_2(\xi)$ — скаляры; $b_2(\xi) > 0, \ a_n > 0, \ \xi \in \Xi$ — неизвестные параметры OУ.

Предполагается управляемость ОУ (1), (2) при $\forall \xi \in \Xi$.

Целью управления (ЦУ) является ограниченность всех траекторий системы (1), (2) и достижение предельного соотношения

$$\mathbf{e}(t) \to \mathbf{0} \text{ при } t \to \infty,$$
 (3)

где $\mathbf{e} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_1^*$ — ошибка слежения; $\mathbf{x}_1^* = (x_{11}^* \ x_{12}^* \ \cdots \ x_{ln}^*)^{\mathrm{T}} \in R^n$ — желаемая траектория выходного каскада — ограниченная дифференцируемая вектор-функция.

Методика синтеза. Введём виртуальное управление $x_{2\text{virt}}(\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\xi})$ конечным каскадом и отклонение реального входа конечного каскада x_2 от виртуального управления $x_{2\text{virt}}$

$$\sigma = x_2 - x_{2virt}. \tag{4}$$

Этап 1. Синтез «идеального» виртуального управления. Синтезируем «идеальное» виртуальное управление выходным каскадом при полной априорной информации о параметрах выходного каскада и в предположении, что система находится на многообразии $\sigma = 0$.

В целях увеличения точности повысим астатизм конечного каскада за счёт добавления интегратора к выходному каскаду. Тогда расширенный выходной каскад (1) примет вид

$$\dot{\mathbf{x}}_{1} = \mathbf{A}_{11}(\xi)\mathbf{x}_{1} + \mathbf{a}_{12}(\xi)(x_{2\text{virt}} + \sigma);$$

 $\dot{x}_{2\text{virt}} = \nu,$ (5)

где v — новый вход.

Таким образом, виртуальное управление x_{2virt} определяется как интеграл от v.

Относительная степень ρ (наименьший порядок производной от выхода, зависящий от входа) подсистемы (5) от нового входа v к x_{11} равна n+1. Введём новый информационный выход y_{inf} в виде комбинации ошибки слежения выхода выходного каскада и её производных:

$$y_{\rm inf} = g(p)e_1, \tag{6}$$

где $e_1=x_{11}-x_{11}^*$; $g(p)=p^{\rho-1}+g_{\rho-2}p^{\rho-2}+\cdots+g_0$ — гурвицевый многочлен; p=d/dt — оператор дифференцирования.

Очевидно, что из условия $y_{\inf} \to 0$ при $t \to \infty$ и гурвицевости многочлена g(p) следует достижение ЦУ (3).

Зададим желаемую траекторию выходного каскада в виде $g(p)x_{11}^* = g_0r$, где r — гладкая, ограниченная вместе со своей производной функция. Тогда равенство (6) примет вид

$$y_{\text{inf}} = g(p)x_{11} - g_0 r =$$

$$= x_{11}^{(n)} + g_{n-1}x_{11}^{(n-1)} + \dots + g_1x_{11}^{(1)} + g_0x_{11} - g_0 r. \quad (7)$$

Представим (7) во временной области:

$$y_{\text{inf}} = \mu(\mathbf{x}_1, \, \boldsymbol{\xi}_1, \, r) + a_n x_{2\text{virt}},$$
 (8)

где
$$\mu(\mathbf{x}_1, \, \boldsymbol{\xi}_1, \, r) = \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{\xi}_1)\mathbf{x}_1 - g_0r;$$

 $\mathbf{g}(\boldsymbol{\xi}_1) = (g_0 + a_{n1} \quad g_1 + a_{n2} \quad \cdots \quad g_{n-1} + a_{nn})^{\mathrm{T}};$
 $\boldsymbol{\xi}_1 = (a_{n1} \quad a_{n2} \quad \cdots \quad a_{nn})^{\mathrm{T}}.$

Вычисляя производную по времени от информационного выхода (8), получаем

$$\dot{y}_{\rm inf} = \dot{\mu}(\mathbf{x}, \xi, \dot{r}) + a_n v, \tag{9}$$

где $\dot{\mu}(\mathbf{x}, \xi, \dot{r}) = \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\xi_{1})\dot{\mathbf{x}}_{1} - g_{0}\dot{r} = \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\xi_{1})(\mathbf{A}_{11}(\xi)\mathbf{x}_{1} + \mathbf{a}_{12}(\xi)\mathbf{x}_{2\mathrm{virt}}) - g_{0}\dot{r}; \quad \xi = (\xi_{1}^{\mathrm{T}}, a_{n})^{\mathrm{T}}$ — точные значения параметров выходной подсистемы.

При известных параметрах ОУ выберем «идеальный» вход v^* в виде

$$v^* = -a_n^{-1}(\dot{\mu}(\mathbf{x}, \xi, \dot{r}) + \gamma y_{\text{inf}}),$$
 (10)

где $\gamma > 0$.

Рассмотрим систему (5) с входом (10). Докажем, что $y_{\inf} \to 0$ при $t \to \infty$, методом функций Ляпунова. Выберем в качестве кандидатуры на роль функции Ляпунова

$$Q_y(y_{\rm inf}) = 0.5y_{\rm inf}^2.$$
 (11)

Производная по времени функции (11) в силу системы (9) с учётом (10) примет вид

$$\dot{Q}_{v}(y_{\rm inf}) = y_{\rm inf}\dot{y}_{\rm inf} = -\gamma y_{\rm inf}^2 \leqslant -2\gamma Q_{v}(y_{\rm inf}).$$

Следовательно, $y_{\inf}(t) \to 0$ при $t \to \infty$ и ЦУ (3) достигается.

Заметим, что ЦУ (3) достигается в предположении, что параметры выходного каскада известны. Синтезируем алгоритм адаптации параметров выходного каскада (1) с помощью *настраиваемой модели* (НМ) выходного каскада.

Этап 2. Идентификация параметров выходного каскада. Сформулируем дополнительную цель управления (ДЦУ) — идентификацию параметров объекта управления:

$$\lim_{t \to \infty} \hat{\xi}(t) = \xi. \tag{12}$$

Рассмотрим HM динамики старшей производной выходного каскада

$$\dot{x}_{1n}^{\mathrm{HM}} = \mathbf{v},\tag{13}$$

где $x_{ln}^{\mathrm{HM}} \in R^{\mathrm{l}}$ — фазовая координата НМ; υ — входное управляющее воздействие НМ; $\varepsilon = x_{ln} - x_{ln}^{\mathrm{HM}}$ — невязка.

Сформулируем ДЦУ по отношению к синтезу входного управляющего воздействия v:

$$\lim_{t\to\infty} Q_{\varepsilon}(\varepsilon(t)) \to 0$$
 при $t\to\infty,$ (14)

где $Q_{\varepsilon}(\varepsilon(t))$ — целевой функционал (ЦФ) вида

$$Q_{\varepsilon}(\varepsilon(t)) = 0.5\varepsilon^{2}.$$
 (15)

Синтезируем «идеальное» управление о* настраиваемой моделью (13) в предположении, что параметры известны. Для синтеза рассмотрим динамику выходного каскада по ошибке:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{x}_{1n} - \upsilon^* (\mathbf{x}, \varepsilon, \xi). \tag{16}$$

Выберем υ* в виде

$$v^*(\mathbf{x}, \varepsilon, \xi) = \dot{x}_{1n} + \alpha \varepsilon = \xi^{\mathrm{T}} \mathbf{x} + \alpha \varepsilon, \tag{17}$$

где $\alpha > 0$ — коэффициент обратной связи.

Производная по времени от ЦФ (15) с учётом (16), (17) примет вид

$$\dot{Q}_{\varepsilon} = \varepsilon (\dot{x}_{1n} - \upsilon) = -\alpha \varepsilon^2 < -2\alpha Q_{\varepsilon}.$$

Таким образом, «идеальное» управляющее воздействие υ^* вида (17) обеспечивает достижение ДЦУ (14), $\varepsilon \to 0$ при $t \to \infty$.

Заменим в (17) неизвестные параметры ξ настраиваемыми $\hat{\xi}$. Тогда управление НМ примет вид

$$v(\mathbf{x}, \varepsilon, \hat{\boldsymbol{\xi}}) = \dot{x}_{1n}(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\xi}}) + \alpha \varepsilon = \hat{\boldsymbol{\xi}}^{\mathrm{T}} \mathbf{x} + \alpha \varepsilon.$$
 (18)

Закон адаптации выберем в форме алгоритма скоростного градиента (АСГ) [7] в дифференциальной форме

$$\dot{\hat{\xi}} = -\mathbf{\Gamma} \nabla_{\hat{\xi}} \dot{Q}_{\varepsilon} = \varepsilon \mathbf{\Gamma} \mathbf{x}, \iff \begin{cases} \dot{\hat{\xi}}_{1} = \varepsilon \mathbf{\Gamma}_{1} \mathbf{x}_{1}; \\ \dot{a}_{n} = \gamma_{n+1} \varepsilon x_{2}, \end{cases}$$
(19)

где $\Gamma = \text{diag}\left\{\gamma_1, \gamma_2...\gamma_{n+1}\right\} > 0$ — матрица коэффициентов усиления.

Определение [7]. Матричная функция $\Phi(t)$ — интегрально невырожденная на $[0, \infty)$, если она измерима и ограничена на $[0, \infty)$ и существуют константы k > 0, L > 0, при которых выполняется неравенство

$$\int_{\tau}^{\tau+L} \mathbf{\Phi}^{\mathrm{T}}(s) \mathbf{\Phi}(s) ds \geq k \mathbf{I} \ \forall \tau \geq 0,$$

где I — единичная матрица.

Определение [8]. Система называется ВІВОустойчивой, если из ограниченности входа следует ограниченность её выхода.

Теорема 1. Пусть подсистема S_1 BIBO-устойчива и вектор-функция $\Phi = \nabla_{\hat{\xi}} \dot{\mathcal{Q}}_{\epsilon} = \mathbf{x}^{\mathsf{T}}$ — интегрально невырожденная на $[0, \infty)$. Тогда в системе, состоящей из выходного каскада (1), НМ (13) со входом (18) и контуром адаптации (19), достигаются ДЦУ (12) и (14) и существует функция Ляпунова

$$V_1 = Q_{\varepsilon} + 0, 5(\hat{\xi} - \xi)^{\mathrm{T}} \Gamma^{-1}(\hat{\xi} - \xi).$$

Доказательство. Вычислим производную по времени от функции V_1 в силу системы (16), (18):

$$\begin{split} \dot{V}_1 &= \varepsilon (\dot{x}_{1n}(\mathbf{x}, \xi) - \dot{x}_{1n}(\mathbf{x}, \hat{\xi}) - \alpha \varepsilon) + (\hat{\xi} - \xi)^{\mathrm{T}} \mathbf{\Gamma}^{-1} \dot{\hat{\xi}} = \\ &= -\alpha \varepsilon^2 + (\hat{\xi} - \xi)^{\mathrm{T}} (-\varepsilon \mathbf{x} + \mathbf{\Gamma}^{-1} \dot{\hat{\xi}}). \end{split}$$

С учётом (19) $\dot{V_1} = -\alpha \varepsilon^2 = -2\alpha \, Q_\varepsilon$. Таким образом, все переменные в V_1 ограничены.

Из (18) с учётом ограниченности є и ВІВОустойчивости S_1 следует ограниченность $x_{1n}^{\text{нм}}$ и входа $v(\mathbf{x}, \varepsilon, \hat{\boldsymbol{\xi}})$. Тогда из (16) и ограниченности входа $\upsilon(\mathbf{x}, \varepsilon, \hat{\boldsymbol{\xi}})$ следует ограниченность $\dot{\varepsilon}$. Так как $\ddot{V_1} = -2\alpha\varepsilon\dot{\varepsilon}$ — ограниченная функция, следовательно, $\dot{V_1}$ — равномерно-непрерывна и по лемме Барбалата [7] $\dot{V_1} \to 0$, $t \to \infty$ и $\varepsilon \to 0$, $t \to \infty$. Таким образом, ЦУ (14) достигается.

Достижение ДЦУ (12) вытекает из условия интегральной невырожденности векторфункции $\Phi = \mathbf{x}^{\mathsf{T}}$, которое выполняется в случае спектрального богатства входа x_2 конечного каскада. Теорема доказана.

Используем полученные оценки параметров $\hat{\xi}$ для формирования информационного выхода и входа расширенной подсистемы (5). По аналогии с выражениями (8), (10) получаем

$$y_{\rm inf} = \mu(\hat{\xi}) + \hat{a}_n x_2, \tag{20}$$

где
$$\mu(\mathbf{x}_1, \hat{\xi}_1, r) = \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\hat{\xi}_1)\mathbf{x}_1 - g_0r;$$

 $\mathbf{g}(\hat{\xi}_1) = (g_0 + \hat{a}_{n1} \quad g_1 + \hat{a}_{n2} \quad \cdots \quad g_{n-1} + \hat{a}_{nn})^{\mathrm{T}};$

$$v = -\hat{a}_n^{-1}(\dot{\mu}(\mathbf{x}, \hat{\boldsymbol{\xi}}, \dot{r}) + \gamma y_{\text{inf}}), \tag{21}$$

где $\dot{\mu}(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{\xi}}, \dot{r}) = \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\hat{\mathbf{\xi}}_1)(\mathbf{A}_{11}(\hat{\mathbf{\xi}})\mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_{12}(\hat{\mathbf{\xi}})\mathbf{x}_2) - g_0\dot{r}$ — локально ограниченная по аргументам функция.

Замечание. При измеримости старшей производной $x_{11}^{(n)}$ можно использовать управление $v=-\gamma \, {\rm sgn} \, y_{\rm inf},$ являющееся робастным по отношению к мультипликативным и аддитивным возмущениям (НМ отсутствует).

Этап 3. Синтез управления замкнутой системой. Введём ДЦУ в виде неравенства

$$R(\sigma(t)) \to 0$$
 при $t \to \infty$, (22)

где $R(\sigma) = 0.5\sigma^2$.

Алгоритм управления, обеспечивающий достижение ДЦУ (22), синтезируется в виде

$$u = -\tau \operatorname{sgn}(\sigma + \hat{a}_n y_{\inf}), \ \tau > 0.$$
 (23)

Теорема 2. Пусть $\hat{\xi} \equiv \xi$, тогда для системы (1), (2), многообразия (4), информационного выхода (20), входа (21), управления (23) при любых ограниченных начальных условиях существует τ_* , такое, что при $\tau > \tau_*$ все траектории ограничены и выполняются предельные соотношения $y_{\text{inf}} \to 0$, $\sigma \to 0$ при $t \to \infty$ (цели управления (3), (22) достигаются) и существует функция Ляпунова вида

$$V_2(y_{\rm inf}, \sigma) = Q_{\nu}(y_{\rm inf}) + R_{\sigma}(\sigma). \tag{24}$$

Доказательство. Найдём производную по времени от функции (24) в силу системы (1), (2), (4), (20), (21), (23). Для простоты опустим аргументы, где это возможно.

Из (4), (20), (21), (23) получаем

$$\dot{V}_{2} = y_{\inf}(\dot{\mu} + \hat{a}_{n}(\dot{\sigma} + \dot{x}_{2\text{virt}})) + \sigma\dot{\sigma} =
= y_{\inf}(\dot{\mu} + \hat{a}_{n}(\dot{\sigma} + v)) + \sigma\dot{\sigma} =
= -\gamma y_{\inf}^{2} + (\hat{a}_{n}y_{\inf} + \sigma)\dot{\sigma} =
= -2\gamma Q_{y} + (\hat{a}_{n}y_{\inf} + \sigma)(\dot{x}_{2} - \dot{x}_{2\text{virt}}) =
= -2\gamma Q_{y} + (\hat{a}_{n}y_{\inf} + \sigma)(\eta(\cdot) - b_{2}\tau \operatorname{sgn}(\hat{a}_{n}y_{\inf} + \sigma)), (25)$$

где
$$\eta(\cdot) = \mathbf{a}_{21}^{\mathrm{T}} \mathbf{x}_1 + a_{22} \mathbf{x}_2 - v.$$

Положим $\tau_* = |\eta(\cdot)|/b_2$. Выбирая в (25) $\tau \geqslant \tau_* + \tau_0, \ \tau_0 > 0, \$ получаем

$$\dot{V}_2(y_{\rm inf},\sigma) \leq -2\gamma Q_v - \tau_0 |\hat{a}_n y_{\rm inf} + \sigma| < 0.$$

Следовательно, все траектории замкнутой системы ограничены, $y_{\rm inf} \to 0$, $\hat{a}_n y_{\rm inf} + \sigma \to 0$, $\sigma \to 0$ при $t \to \infty$. Теорема доказана.

Таким образом, поставленная задача управления решена в два этапа: сначала проведена идентификация параметров, а затем — управление по оценкам. Итоги синтеза сформулированы в теоремах 1 и 2. Анализ доказательства теоремы 1 показывает, что ВІВО-устойчивость выходного каскада — достаточное условие ограниченности переменных \dot{x}_{1n} и, как следствие, $x_{1n}^{\rm HM}$. Нарушение этого условия не влияет на достижение ДЦУ (12), (14). Поэтому данное условие можно ослабить, потребовав локальную ограниченность x_{1n} .

Из доказательства теоремы 2 легко показать, что при $\xi \equiv \xi$ переменная \dot{x}_{1n} ограничена (следует из гурвицевости g(s) и ограниченности r(t)). Так как в результате оценивания $\|\xi(t) - \xi\|$ — ограниченная величина и $\xi(t) \to \xi$ при $t \to \infty$, следовательно, вариация входа v^* или v (см. (10), (21)) ограничена, $v(t) \rightarrow v^*$ при $t o \infty$ и \dot{x}_{1n} будет ограничена. В производной функции Ляпунова V_2 при вариации $\hat{\xi}$ относительно ξ появятся убывающие по времени слагаемые, пропорциональные $\|\xi(t) - \xi\|$, которые отчасти могут быть скомпенсированы увеличением τ_* . Наконец, следует заметить, что в выражение (21) входит \hat{a}_n^{-1} , поэтому алгоритм идентификации (19) следует модифицировать для предотвращения деления на нуль. Это обеспечивается, например, при использовании алгоритма огрубления

$$\tilde{a}_{n} = \gamma_{n+1} \varepsilon x_{2},$$

$$\hat{a}_{n} = \begin{cases}
\tilde{a}_{n} \operatorname{npu} |\tilde{a}_{n}| > \delta; \\
\delta \operatorname{sgn}(a_{n}) \operatorname{npu} |\tilde{a}_{n}| \leq \delta;
\end{cases}$$

$$\operatorname{sgn}(\tilde{a}_{n}(0)) = \operatorname{sgn}(a_{n}); \quad 0 < \delta < \min_{\xi \in \Xi} a_{n}(\xi).$$

Заметим, что условие интегральной невырожденности \mathbf{x}^{T} теоремы 1 можно обеспечить выполнением требования — задающее воздействие r(t) содержит l различных гармоник, где l — число, не менее половины размерности вектора оценок ξ ($l \ge 0,5 \dim \xi$).

Приведённые выше рассуждения позволяют сформулировать следующее **утверждение:** в системе (1), (2), (4), (20), (21), (23) с настраиваемой моделью (13), (18), (19) при достаточном богатстве спектра задающего воздействия ($l \ge 0.5 \text{dim} \xi$) достигаются ЦУ (3), (12), (14), (22).

Пример. Продемонстрируем применение предложенной методики для задачи слежения линейного каскадного объекта третьего порядка. Двухкаскадная система описывается системой линейных уравнений

OY:
$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{a}_{11} \mathbf{x}_1 + \mathbf{a}_{12} x_2; \\ \dot{x}_2 = \mathbf{a}_{21} \mathbf{x}_1 + \overline{a}_{22} x_2 + b_2 u, \end{cases}$$

где
$$\mathbf{a}_{11} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}; \ \mathbf{a}_{12} = \begin{pmatrix} 0 \\ a_{2} \end{pmatrix}; \ \mathbf{a}_{21}$$
 — вектор (1 × 2); \overline{a}_{22} , b_{2} — параметры ОУ (b_{2} > 0);

ЦУ:
$$\mathbf{e} \to \mathbf{0}$$
 при $t \to \infty$; $\mathbf{e} = \dot{\mathbf{x}}_1 - \dot{\mathbf{x}}_1^*$,

и ограниченность x_2 .

В результате синтеза имеем: НМ вида (13)

$$\dot{x}_{12}^{\rm HM} = \upsilon = \hat{a}_{21} x_{11} + \hat{a}_{22} x_{12} + \hat{a}_{2} x_{2} + \alpha \varepsilon,$$

где
$$\varepsilon = x_{12} - x_{12}^{HM}$$
;

контур адаптации в форме (19) вида

$$\dot{\hat{a}}_{21} = \gamma_1 \varepsilon x_{11}; \ \dot{\hat{a}}_{22} = \gamma_2 \varepsilon x_{12}; \ \dot{\hat{a}}_2 = \gamma_3 \varepsilon x_2;$$

информационный выход в форме (20)

$$y_{\text{inf}} = (g_0 + \hat{a}_{21})x_{11} + (g_1 + \hat{a}_{22})x_{12} + \hat{a}_2x_2 - g_0r;$$

виртуальное управление

$$\dot{x}_{2\text{virt}} = v = -\hat{a}_{2}^{-1} \{ (g_{1} + \hat{a}_{22}) \hat{a}_{21} x_{11} + \hat{a}_{2} x_{2} + + \gamma y_{\text{inf}} - g_{0} \dot{r} + (g_{0} + \hat{a}_{21} + (g_{1} + \hat{a}_{22}) \hat{a}_{22}) x_{12} \};$$

управление в форме (23)

$$u = -\tau \operatorname{sgn}(\sigma + \hat{a}_2 y_{\inf});$$

задающее воздействие согласно условию $l \geqslant 0,5 \dim \xi$, которое выберем в виде двух разных гармоник

$$r = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t).$$

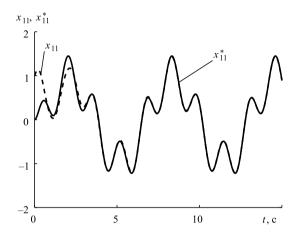


Рис. 1. Выход x_{11} и желаемая траектория x_{11}^*

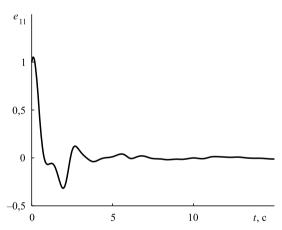


Рис. 2. Ошибка слежения e_{11}

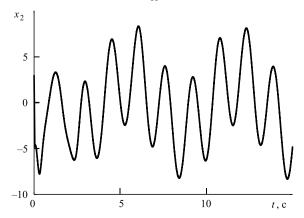


Рис. 3. Выход входного каскада x_2

На рис. 1...8 приведены результаты моделирования при параметрах объекта управления $a_{21}=5;\ a_{22}=-2;\ a_2=2;\ a_{21}=(2\ 3);\ \overline{a}_{22}=1;\ b_2=2;$ начальных условиях $x_{11}(0)=1;\ x_{12}(0)=1;\ x_2(0)=3;\ x_{2\text{virt}}(0)=2;\ x_{11}^*(0)=0;\ x_{12}^{\text{HM}}(0)=1;\ \hat{a}_{21}(0)=6;\ \hat{a}_{22}(0)=-1;\ \hat{a}_{2}(0)=3;$ задающем воздействии $r=\sin(t)+\cos(4t);$ параметрах адаптера $\gamma_1=12;\ \gamma_2=1,7;\ \gamma_3=0,5;$ параметрах регулятора $g_1=5;\ g_0=10;\ \gamma=160;\ \alpha=2;\ \tau=100.$

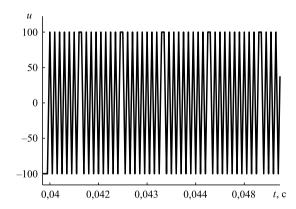
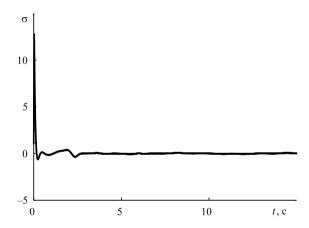


Рис. 4. Управление и



Puc. 5. Отклонение от многообразия $\sigma \equiv 0$

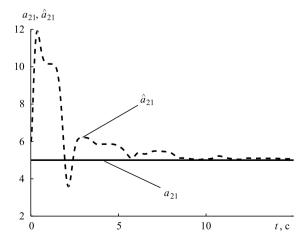


Рис. 6. Параметр a_{21} и его оценка \hat{a}_{21}

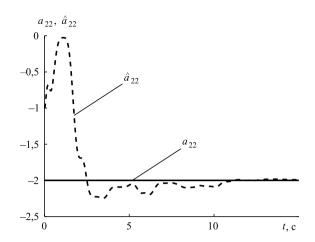


Рис. 7. Параметр a_{22} и его оценка \hat{a}_{22}

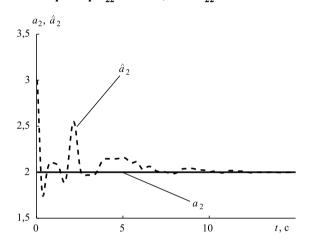


Рис. 8. Параметр a_2 и его оценка \hat{a}_2

Из рис. 1, 2 следует, что ЦУ (3) достигается, траектория выходного каскада совпадает с желаемой траекторией x_{11}^* . На рис. 1...4, 6...8 видно, что все траектории системы ограничены. Рис. 5 демонстрирует асимптотическое стремление траектории системы к многообразию $\sigma \equiv 0$. На рис. 6...8 видно, что ДЦУ (12) достигается.

Заключение. Представлен один из подходов к синтезу адаптивного управления линейными каскадными системами с интегральным виртуальным управлением. Сформулированы и доказаны теоремы, подтверждающие дости-

жение целей управления. Особенностью работы является объединение идей интегрального управления и теории пассификации для синтеза виртуального управления выходным каскадом. Предложенная методика применена для решения задачи слежения в условиях параметрической неопределённости для линейного каскадного объекта третьего порядка. Представлены результаты компьютерного моделирования замкнутой системы, подтверждающие достижение заданной цели управления.

Библиографические ссылки

- 1. **Kokotovic P.V.** The joy of feedback: nonlinear and adaptive // IEEE Control Systems. June 1992. Vol. 12. Iss. 3. P. 7—17.
- 2. **Utkin V.I.** Variable structure systems with sliding modes // IEEE trans. on Automatic Control. 1977. Vol. 22. No. 2. P. 212—222.
- 3. **Мышляев Ю.И.** Метод бискоростного градиента // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 5-1. С. 168—178.
- 4. **Халил Х.К.** Нелинейные системы. М. Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009. 832 с.
- 5. **Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л.** Метод пассификации в задачах адаптивного управления, оценивания и синхронизации // Автоматика и Телемеханика. 2006. № 11. С. 3—37.
- 6. **Levant A.** Robust exact differentiation via sliding mode technique // Automatica. 1998. Vol. 34. No. 3. P. 379—384.
- 7. **Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
- 8. **Moornani K.A., Haeri M.** Necessary and sufficient conditions for BIBO-stability of some fractional delay systems of neutral type // IEEE trans. on Automatic Control. 2011. Vol. 56. No. 1. P. 125—128.

Ссылка для цитирования

Мышляев Ю.И., Нгуен Ти Тхань, Финошин А.В. Непрямое адаптивное управление каскадными системами с интегральным виртуальным алгоритмом // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 421—427.

Вниманию авторов!

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

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ



УДК 681.518

В.В. Клычников, М.С. Селезнева, К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **А.В. Пролетарский,** д-р техн. наук, проф.,

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

m.s.selezneva@mail.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ КОРРЕКЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Исследован алгоритмический способ коррекции навигационной информации летательного annaрата с использованием спутниковой и инерциальной навигационных систем. Повышение точности навигационных определений осуществляется путём оценивания погрешностей навигационной системы адаптивным и федеральным фильтрами Калмана.

Ключевые слова: федеральный фильтр Калмана; инерциальная навигационная система; спутниковая навигационная система; адаптивный алгоритм оценивания; алгоритмическая коррекция.

The algorithmic method of the aircraft navigation information correction through the use of satellite and inertial navigation systems is investigated. Increasing the navigational definitions accuracy is carried out by estimating the errors of the navigation system with adaptive and federal Kalman filters.

Keywords: Kalman federal filter; inertial navigation system; satellite navigation system; adaptive estimation algorithm; algorithmic correction.

Введение. Определение навигационных параметров различных динамических объектов, в частности летательных аппаратов (ЛА), осуществляется с помощью измерительных систем и комплексов [1, 2]. На современном этапе развития измерительной техники наиболее точными измерительными системами являются инерциальная навигационная система (ИНС) и спутниковые навигационные системы (СНС) ГЛОНАСС и GPS [2]. Измерительные системы имеют разнообразные погрешности, поэтому для повышения точности определения навигационных параметров ЛА применяют различные схемы алгоритмической коррекции [3, 4], которые предполагают совместную обработку сигналов ИНС и СНС с помощью алгоритма оценивания.

Наиболее точными являются адаптивные алгоритмы оценивания, с помощью которых вычисляют оценки погрешностей ИНС, а затем их используют для компенсации в выходном сигнале ИНС.

Данная статья посвящена повышению точности навигационных определений с помощью современных адаптивных алгоритмов оценивания.

Алгоритмы коррекции навигационных систем. В режиме совместной работы ИНС и СНС используется схема коррекции с помощью алгоритмов оценивания [3, 4], представленная на рис. 1.

Коррекция ИНС в выходной информации системы обычно осуществляется с помощью алгоритмов оценивания. В качестве алгоритмов оценивания используются различные линейные фильтры [4], нелинейные алгоритмы оценивания [5] и адаптивные наблюдатели [6]. Нелинейные алгоритмы и адаптивные наблюдатели сложны в реализации в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) ЛА. Линейные фильтры, в частности фильтр Калмана, отличаются простотой реализации,

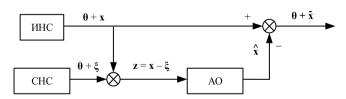


Рис. 1. Функциональная схема коррекции ИНС от СНС с алгоритмом оценивания:

АО — алгоритм оценивания; θ — истинная информация о навигационных параметрах динамического объекта; \mathbf{x} — вектор погрешностей ИНС; $\mathbf{\xi}$ — вектор погрешностей СНС; \mathbf{z} — вектор измерений; $\hat{\mathbf{x}}$ — оценка погрешностей ИНС; $\hat{\mathbf{x}}$ — ошибки оценивания погрешностей ИНС

но имеют невысокую точность в условиях отсутствия достоверной априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов, а также матрицы модели оцениваемого процесса. Фильтр Калмана [5] теоретически позволяет получить оптимальную оценку вектора состояния системы. В практических приложениях оценка фильтра Калмана может иметь расходящийся характер [6, 7]. Однако уравнения фильтра Калмана очень удобны для осуществления адаптивной модернизации, которая имеет своей целью получение нерасходящейся оценки состояния динамического объекта. Поэтому рассмотрим фильтр Калмана подробнее.

Оптимальный фильтр Калмана. Рассмотрим дискретное линейное уравнение, описывающее динамический объект, например, изменение погрешностей ИНС:

$$\mathbf{x}_{k} = \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{\Gamma}_{k-1} \mathbf{w}_{k-1}, \tag{1}$$

где \mathbf{x}_k — вектор состояния; $\mathbf{\Phi}_{k,\;k-1}$ — матрица объекта; $\mathbf{\Gamma}_{k-1}$ — матрица входа; \mathbf{w}_{k-1} — вектор входного возмущения.

Входные возмущения \mathbf{w}_{k-1} предположительно являются дискретным аналогом гауссовского белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей \mathbf{Q}_{k-1} .

Часть вектора состояния измеряется как

$$\mathbf{z}_{k} = \mathbf{H}_{k} \mathbf{x}_{k} + \mathbf{v}_{k}, \tag{2}$$

где \mathbf{z}_k — вектор измерений; \mathbf{H}_k — матрица измерений; \mathbf{v}_k — вектор ошибок измерения.

Ошибки измерений \mathbf{v}_k предположительно являются дискретным аналогом гауссовского белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей \mathbf{R}_k . Ошибки измерения (иначе измерительный шум) и входные возмущения (иначе входной шум) некоррелированы: $E[\mathbf{v}_j\mathbf{w}_k^{\mathrm{T}}] = 0$ при любых j и k.

Начальное значение вектора состояния полагаем не зависящим от входных возмущений и ошибок измерений, т. е. $E[\mathbf{x}_0\mathbf{w}_k^{\mathsf{T}}] = 0$ и $E[\mathbf{x}_0\mathbf{v}_k^{\mathsf{T}}] = 0$ для любого k. Ковариационная матрица $E[\mathbf{x}_0\mathbf{x}_0^{\mathsf{T}}] = \mathbf{P}_0$ представляет собой неотрицательно определённую матрицу.

Требуется на основе математического ожидания объекта, априорной информации о статистических характеристиках входных и из-

мерительных шумов, осуществляя измерения части вектора состояния, оценить вектор состояния так, чтобы функционал J_k принимал минимальное значение [5]:

$$J_k = E[(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)^{\mathrm{T}}(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)] \to \min, \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{x}}_k$ — оценка вектора состояния.

Оптимальная оценка вектора состояния определяется из уравнения

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{K}_k \mathbf{v}_k, \tag{4}$$

где \mathbf{K}_k — матрица усиления фильтра; $\mathbf{v}_k = \mathbf{z}_k$ — $\mathbf{H}_k \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1}$ — обновляемая последовательность.

Уравнение (4) имеет следующий физический смысл. На основе оценки вектора состояния и матрицы объекта производится прогноз для следующего шага вычисления оценки. Одновременно производится коррекция этого прогноза с помощью обновляемой последовательности, которая представляет собой совокупность ошибки прогноза и измерительного шума.

Матрица усиления фильтра определяет вес, с которым обновляемая последовательность участвует в формировании оценки вектора состояния. В случае проведения идеальных измерений, т. е. когда измерительный шум отсутствует, матрица усиления выбирается максимальной. Чем больше измерительный шум, тем с меньшим весом учитывается обновляемая последовательность при формировании оценки вектора состояния.

Уравнения фильтра Калмана имеют вид [5—7]

$$\hat{\mathbf{x}}_{k} = \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} + \mathbf{K}_{k} \mathbf{v}_{k};$$

$$\mathbf{v}_{k} = \mathbf{z}_{k} - \mathbf{H}_{k} \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \mathbf{x}_{k-1};$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{\Phi}_{k,k-1}^{\mathsf{T}} + \mathbf{\Gamma}_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \mathbf{\Gamma}_{k-1}^{\mathsf{T}}; \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{k} = \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_{k}^{\mathsf{T}} (\mathbf{H}_{k} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_{k}^{\mathsf{T}} + \mathbf{R}_{k})^{-1};$$

$$\mathbf{P}_{k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k} \mathbf{H}_{k}) \mathbf{P}_{k,k-1},$$

где $\mathbf{P}_{k,\;k-1}$ — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; \mathbf{P}_{k} — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания; \mathbf{I} — единичная матрица.

С помощью фильтра Калмана не только осуществляется восстановление всего вектора состояния системы, но и подавляется влия-

ние измерительного шума. Достаточно высокой точностью и в то же время простотой реализации в БЦВМ отличаются адаптивные алгоритмы оценивания, являющиеся прямыми модификациями фильтра Калмана.

Адаптивное оценивание. Адаптивный алгоритм оценивания [5, 8], способный функционировать в условиях отсутствия достоверной статистической информации о входном шуме, отличается от фильтра Калмана видом уравнения для определения априорной ковариационной матрицы ошибок оценивания, которое записывается в следующей форме:

$$\mathbf{P}_{k,k-1} = \mathbf{\Phi}_{k,k-1} \mathbf{P}_{k-1} \mathbf{\Phi}_{k,k-1}^{\mathrm{T}} + \mathbf{K}_{k} E[\mathbf{v}_{k} \mathbf{v}_{k}^{\mathrm{T}}] \mathbf{K}_{k}^{\mathrm{T}}.$$
(6)

Адаптивный алгоритм оценивания, имеет следующий вид:

$$\mathbf{K}_{k} = \begin{cases} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_{k}^{\mathsf{T}} E[\mathbf{v}_{k} \mathbf{v}_{k}^{\mathsf{T}}]^{-1} & \mathsf{при} \\ \mathsf{diag} \left\{ E[\mathbf{v}_{k} \mathbf{v}_{k}^{\mathsf{T}}] \right\} > \mathsf{diag}(\mathbf{H}_{k} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_{k}^{\mathsf{T}}); \\ \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_{k}^{\mathsf{T}} [\mathbf{H}_{k} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_{k}^{\mathsf{T}}]^{-1} & \mathsf{при} \\ \mathsf{diag} \left\{ E[\mathbf{v}_{k} \mathbf{v}_{k}^{\mathsf{T}}] \right\} \leq \mathsf{diag}(\mathbf{H}_{k} \mathbf{P}_{k,k-1} \mathbf{H}_{k}^{\mathsf{T}}). \end{cases}$$
(7)

Вычисление математического ожидания $E[\mathbf{v}_k\mathbf{v}_k^{\mathsf{T}}]$ в адаптивном алгоритме производится в соответствии с формулой

$$E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^{\mathrm{T}}] = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k (\mathbf{v}_j \mathbf{v}_j^{\mathrm{T}}).$$
 (8)

Дальнейшее повышение точности оценивания достигается путём использования информации от дополнительных измерительных систем и датчиков, работающих, как правило, на различных физических принципах [8, 9]. Обработка измерительной информации от нескольких датчиков обычно осуществляется с помощью алгоритмов комплексирования [9, 10]. В задачах навигации ЛА используются ИНС, СНС, РЛС, астродатчики и др. [10, 11].

Алгоритмы комплексирования предполагают применение какого-либо способа статистической обработки измерительных сигналов или критерия селекции [2, 5]. Одним из вариантов комплексной обработки информации от нескольких датчиков является реализация федерального фильтра Калмана [12, 13].

Федеральный фильтр Калмана. Это особый тип децентрализованного фильтра Калмана, который состоит из главного фильтра и нескольких локальных фильтров. На первом

этапе адаптируются стандартные фильтры Калмана как локальные. Следует отметить, что используя метод ограничения верхней дисперсии шума, каждый локальный фильтр становится независимым от других. Структура локальных фильтров децентрализована и параллельна. Кроме того, каждый локальный фильтр соединен со своим датчиком и контрольной системой. Обновление времени и измерений выполняется во всех локальных фильтрах, что приводит к получению субоптимальных оценок. Главный фильтр сглаживает эти субоптимальные оценки, полученные от локальных фильтров, и таким образом, получается глобальная оптимальная оценка. Затем главный фильтр отправляет глобальную оптимальную оценку обратно в каждый локальный фильтр для формирования итеративной процедуры, которая включает способ выделения информации [12, 13]. На рис. 2 показана структура федерального фильтра Калмана.

$$\begin{split} \widehat{X}_{g_{k}} &= P_{g_{k}}(P_{ll_{k}}^{-1}\widehat{X}_{1l_{k}} + \ldots + P_{nl_{k}}^{-1}\widehat{X}_{nl_{k}}); \\ P_{g_{k}} &= P_{ll_{k}}^{-1} + \ldots + P_{nl_{k}}^{-1}; \\ X_{i_{k}} &= X_{g_{k}}; \\ \beta_{1} + \ldots + \beta_{n} &= 1; \\ K_{i_{k}}^{-1} &= \beta_{i}K_{g_{k}}^{-1}; \\ P_{i_{k}}^{-1} &= \beta_{i}P_{g_{k}}^{-1}, \end{split} \tag{9}$$

где \widehat{X}_{il} , P_{il} — оценка вектора состояния, полученная из локального фильтра; \widehat{X}_g , P_{gl} — оценка вектора состояния, полученная из главного фильтра; β_i — коэффициент распределения информации между локальными фильтрами.

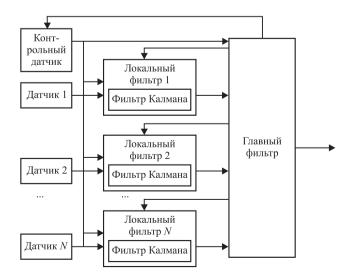


Рис. 2. Структура федерального фильтра Калмана

При больших погрешностях одного из датчиков коэффициент распределения информации для получения оценок позволяет использовать информацию с других датчиков. Таким образом, реализована идея комплексирования датчиков для обеспечения максимально возможной точности оценивания. Учитывая, что при реализации фильтров Калмана (см. рис. 2) необходима достоверная априорная информация о статистических характеристиках шумов, которая в практических приложениях отсутствует, целесообразно использовать в структуре федерального фильтра адаптивные алгоритмы оценивания (6) и (7).

Результаты моделирования разработанных алгоритмов. Для моделирования использованы тестовая математическая модель одного горизонтального канала погрешностей ИНС и типовая модель погрешностей СНС. Модели погрешностей навигационных систем сформированы с использованием датчиков случайных чисел и уравнения (1), где

$$\begin{split} \mathbf{x}_k &= \begin{bmatrix} \delta V_k \\ \Phi_k \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}; \, \mathbf{w}_{k-1} = \begin{bmatrix} B_{k-1} \\ 0 \\ w_{k-1} \end{bmatrix}; \\ \mathbf{\Phi}_{k,k-1} &= \begin{bmatrix} 1 & -gT & 0 \\ \frac{T}{R} & 1 & T \\ 0 & 0 & 1-\mu T \end{bmatrix}; \\ \mathbf{\Gamma}_{k-1} &= \begin{bmatrix} T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Lambda T \sqrt{2\mu} \end{bmatrix}. \end{split}$$

Здесь δV_k — ошибки ИНС в определении скорости; Φ_k — угол отклонения гиростабилизированной платформы (ГСП) относительно опорной системы координат; ε_k — скорость дрейфа ГСП; B_{k-1} , w_{k-1} — дискретные аналоги белого гауссовского шума; g — гравитационное ускорение; T — период дискретизации; R — радиус Земли; μ — средняя частота случайного изменения дрейфа; Λ — среднеквадратичное отклонение случайного значения дрейфа.

Предполагается, что в уравнении (2) $\mathbf{H} = [1\ 0\ 0]$, т. е. измеряется только погрешность в определении скорости.

На рис. 3 показана оценка ошибок ИНС в определении скорости. На рис. 4 представлены результаты моделирования погрешностей ИНС с разработанным алгоритмом.

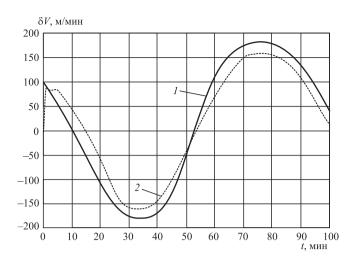


Рис. 3. Оценка ошибок ИНС в определении скорости: 1- ошибки ИНС в определении скорости; 2- оценка ошибок ИНС в определении скорости адаптивным алгоритмом

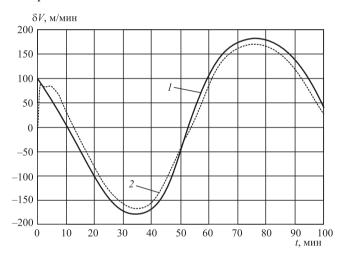


Рис. 4. Оценка ошибок ИНС в определении скорости с разработанным алгоритмом:

1 — ошибки ИНС в определении скорости; 2 — оценка ошибок ИНС в определении скорости разработанным алгоритмом

Из графиков видно, что при использовании разработанного алгоритма оценивания с использованием федерального фильтра Калмана удаётся повысить точность навигационных определений.

Выводы. Представлены алгоритмы оценивания, применяемые в схеме коррекции ИНС от СНС в выходном сигнале. При использовании нескольких датчиков для повышения точности ИНС предлагается использовать разработанный алгоритм оценивания на основе федерального фильтра Калмана, включающий адаптивные алгоритмы оценивания, не требующие априорной статистической информации об исследуемом процессе. Результаты математического моделирования

подтвердили преимущество разработанного алгоритма.

Разработанная модификация федерального фильтра Калмана позволяет повысить точность навигационных определений.

Библиографические ссылки

- 1. **Клычников В.В., Ли Юе, Селезнева М.С.** Методы совершенствования алгоритмического обеспечения навигационных систем и комплексов ЛА / Достижения вузовской науки: тр. Третьей междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 35-38.
- 2. Джанджгава Г.И., Бабиченко А.В., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Селезнева М.С. Навигационный комплекс с повышенными характеристиками наблюдаемости и управляемости // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 18 24.
- 3. **Кай III., Селезнева М.С., Неусыпин К.А.** Разработка алгоритма коррекции инерциальной навигационной системы в автономном режиме // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 16—20.
- 4. Селезнева М.С., Клычников В.В., Ян И., Сяо С. Алгоритмы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов / Eurasia Science: сб. статей XII Междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 62—63.
- 5. **Неусыпин К.А.** Современные системы и методы наведения, навигации и управления летательными аппаратами. М.: Изд-во МГОУ, 2009. 500 с.
- 6. **Шахтарин Б.И., Шэнь К., Неусыпин К.А.** Модификация нелинейного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1065—1072.

- 7. **Неусыпин К.А., Шэнь К.** Модификация нелинейного фильтра Калмана с использованием генетического алгоритма // Автоматизация. Современные технологии. 2014. № 5. С. 9—12.
- 8. **Селезнева М.С., Неусыпин К.А**. Разработка измерительного комплекса с интеллектуальной компонентой // Измерительная техника. 2016. № 9. С. 10—14.
- 9. **Неусыпин К.А., Селезнева М.С.** Измерительный комплекс с интеллектуальной компонентой для летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 9. С. 27—30.
- 10. **Shen K., Selezneva M.S., Neusypin K.A., Proletar-sky A.V.** Novel variable structure measurement system with intelligent components for flight vehicles // Metrology and Measurement Systems. 2017. T. 24. No. 2. P. 347—356.
- 11. Селезнева М.С., Клычников В.В., Неусыпин К.А., Хэ Юн. Исследование перспективных измерительных комплексов летательных аппаратов / Достижения вузовской науки: тр. Третьей междунар. науч.-практ. конф. 2017. С. 28—35.
- 12. **Xi Zhong Lou, Dao Rong Wu.** An Improve Federal Kalman Filter Based on Smoother for Wireless Localization // Intern. J. of Smart Home. 2014. Vol. 8. No. 5. P. 115—124.
- 13. **Cui-Xia Li, Wei-Ming Liu, Zi-Nan Fu.** GPS/TDOA Hybrid Location Algorithm Based on Federal Kalman Filter // J. of Convergence Information Technology. 2010. Vol. 5. No. 7.

Ссылка для цитирования

Клычников В.В., Селезнева М.С., Неусыпин К.А., Пролетарский А.В. Использование федерального фильтра Калмана для коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 9. С. 428—432.

Уважаемые читатели!

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

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 28.06.2018.Отпечатано в ООО «Канцлер»Подписано в печать 23.08.2018.150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз».Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

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