ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

8 2015 (181)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Ремизов А.Е., Карелин О.О. Оценка в лияния уг ла нак лона нар ужной стенки переходного канала ГТД на угол выхода потока 3

Современные технологии сборки

Ахатов Р .Х., Лаврентьева М.В. Распознавание к онструктивно-технологического состава изделия по его электронной модели 8

Степанова М.А. Соединения типа press-fit (*аналитический обзор*) 15

Широкий А.В., КристальМ.Г. Статистическое моделирование надежности различных структур технологических систем 21

Технологическая оснастка для сборки

Тимофеев А.В., Д ушев С.А., Ермаков А.В., Г олубев С.В., Ив аков А.Ю., Жилкин Л.И. Особенности к онструкции и т ехнологии изг отовления механизма нав едения, применяемог о при изв лечении ОТВ С ак тивной зоны реактора 26

Бурочкин Ю.П. Устройства для крепления шлифовальных инструментов 29

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Алексеев А.А., Во лков Д.И. Бе зразборная диагностик а с остояния динамически нагр уженных уз лов и ме ханизмов ме таллорежущего оборудования на основе анализа вибросигнала 36

Дмитриев А.Я., Митрошкина Т .А., Шутемова Е .В., К ончиц А.В. Совершенствование сборо чных проц ессов с испо льзованием ме тодики планирования экспериментов ЛИС—ХИН и метода анализа рисков FMEA 44

Журнал распространяе тся по по дписке, к оторую мо жно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — **79748**, Объединенному каталогу "Пресса Р оссии" — **84967**, к аталогу "По чта Р оссии" — **60257**) или непосредственно в издательстве

Тел.: (499) 269-54-98. Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: sborka@mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
А.В. МЕДАРЬ, д.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
В.В. ПОРОШИН, д.т.н., проф.
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.
Г.А. ЯРКОВ, инж.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОЛОМНА

Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

ОРЕНБУРГ

А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

САМАРА

Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.п.н., проф.
В.А. НИКОЛАЕВ, к.т.н., проф.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

В.Ф. КУЗЬМИН, к.т.н.
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОЛЬЯТТИ

А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.

ТУЛА

В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

ПОЛЬША

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

О.Г. КРАСИЛЬНИКОВА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1747 от 25 февраля 2000 г.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2015

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

8 2015 (181)

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Remizov A.E., Karelin O.O. Evaluation of influence of outer wall pitch of GTE interturbine duct on outlet swirl angle 3

Modern technologies in assembly

Akhatov R.Kh., Lavrentieva M.V . Recognition of constructive-technological structure the product in its electronic model 8

Stepanova M.A. Press-fit connections (*Analytical review*) 15

Shirokiy A.V., Kristal M.G. Statistical modeling of various structures of the production systems reliability 21

Technological equipment for assembly

Timofeev A.V., Dushev S.A., Ermakov A.V., Golubev S.V ., Ivakov A.Yu., Zhilkin L.I. Design features and fabrication process features of the guidance mechanism used to withdraw reactor core SFAs 26

Burochkin Yu.P. Devices for fastening of grinding tools 29

Quality assurance. Testing. Monitoring

Alekseev A.A., Volkov D.I. Diagnostics without disassembling the state of dynamically loaded assemblies and mechanisms of cutting equipment based on the analysis of the vibration signal 36

Dmitriev A.Ya., Mitroshkina T.A., Shutemova E.V., Konchits A.V. Improving of assembly processes using the design of experiment technique LIS-HIN and the risk analysis method FMEA 44

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" — **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" — **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: (499) 269-54-98. Fax: (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board —
Member of Russian Academy of Science
F.M. MITENKOV

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor)
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
V.V. POROSHIN
B.V. SHANDROV
A.A. SHATILOV
A.G. KHOLODKOVA
G.A. YARKOV

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.G. KARABAN'
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV

IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
V.G. OSETROV
B.A. YAKIMOVICH

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

KOLOMNA
Yu.D. AMIROV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTIUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT

RYBINSK
V.F. BEZIAZYSHNY
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV

SAMARA
M.A. EVDOKIMOV
Yu.A. VASHUKOV
V.A. NIKOLAEV

ST.-PETERSBURG
V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOLIATI
A.I. RYZHKOV

TULA
A.I. PREYS

KHABAROVSK
V.A. LASHKO
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

POLAND
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKI

Executive editors of current issue:
O.G. KRASILNIKOVA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media. Registration certificate IE . 77-1747, February 25, 2000

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2015

УДК 621.438

А.Е. Ремизов, *д-р техн. наук,* **О.О. Карелин,** *канд. техн. наук*
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева)
E-mail: karelin2008rgata@mail.ru

Оценка влияния угла наклона наружной стенки переходного канала ГТД на угол выхода потока

Получена база данных по характеристикам диффузоров с классификацией каналов по конфигурации, величине и типу закрутки. Получены выражения, позволяющие оценить изменение закрутки потока в проектируемых переходных каналах при выборе рациональных геометрических параметров каналов и входной закрутки.

Bank data of diffuser characteristics with classification by configuration and inlet swirl intensity is received. Expressions for evaluation of swirl redevelopment in design interturbine ducts by designation of rational geometric parameters and inlet swirl are received.

Ключевые слова: турбина, переходный канал, наклон стенки, изменение закрутки.

Keywords: turbine, interturbine duct, outer wall pitch, swirl redevelopment.

Введение

Большинство современных авиационных и промышленных газотурбинных двигателей выполняется с переходными каналами. При проектировании значительный интерес представляет исследование работы интегрированной системы "турбина высокого давления — переходный канал — турбина низкого давления (силовая турбина)".

При модификации ГТД за счет каскада низкого давления (силовой турбины) в целях повышения мощности увеличивается либо число ступеней турбины, либо ее диаметр. Увеличение диаметра приводит к росту диффузорности переходного канала

$$q = F_2/F_1,$$

где F_2, F_1 — соответственно площадь выходного и входного сечений канала.

Наряду с диффузорностью существенное влияние на режим течения оказывает наклон наружной стенки канала $\gamma_1/2$. Совместное влияние геометрических параметров на эффективность работы диффузора осложняется наличием входной закрутки потока различного типа: $c_u/r = \text{const}$, $c_u r = \text{const}$, $c_u = \text{const}$, $c_u = \text{var}$ (рис. 1).

При профилировании первых ступеней турбины низкого давления (силовой турбины) для обеспечения их высокой эффективности необходимо знать изменение углов потока в переходном канале. Эмпирические соотношения для инженерной оценки изменения углов потока в переходных каналах, полученные авторами, представлены в работе [1].

Существенный практический интерес представляет исследование изменения углов потока в переходных каналах в зависимости от параметра $\gamma_1/2$. Как показано в работе [1], для различных конфигураций переходных

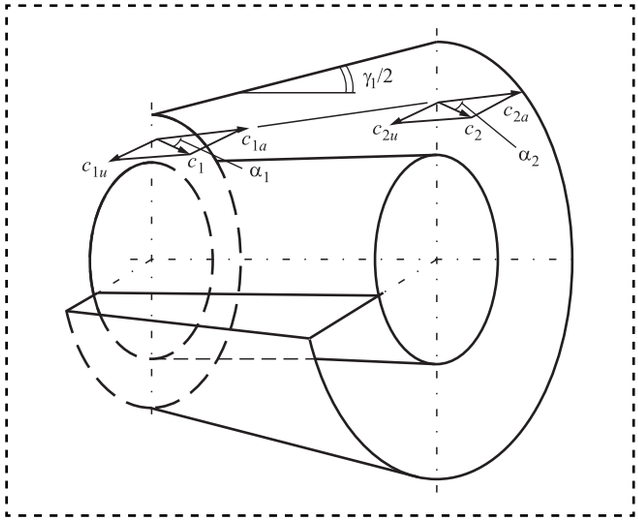

Рис. 1 . Диффузорный переходный канал с входной закруткой потока

sb815.indd 3 27.07.2015 15:01:09

каналов параметр $\gamma_1/2$ варьируется в диапазоне 5...20° и имеет тенденцию к увеличению (в так называемых "агрессивных" переходных каналах).

Вместе с тем рекомендаций по назначению параметра $\gamma_1/2$ для переходных каналов с входной закруткой недостаточно. Это в основном исследования отдельных каналов, а также каналов с небольшим диапазоном варьирования геометрии и закрутки (работы Y. Senoo, N. Kawaguchi, R. Lohmann, S. Markowski, С.А. Довжика, В.М. Картавенко). В работах отечественных и зарубежных авторов используются разные параметры закрутки. Поэтому использование этих данных при проектировании переходных каналов затруднено. Это обусловливает актуальность проводимого исследования.

Основная часть

Настоящая работа является, по существу, продолжением исследований, начатых авторами в работах [1, 2]. В [2] проводился анализ течения с внезапным расширением закрученного потока, в результате которого было выявлено соответствие между параметром, определяющим "жидкую" границу течения, и наклоном наружной стенки диффузора.

Установлено, что необходимым условием обеспечения аэродинамической эффективности диффузора с закруткой потока является назначение геометрических параметров и входной закрутки, при которых обеспечивается свободное расширение потока.

На основании анализа данных отечественных и зарубежных исследователей получена обобщенная характеристика диффузоров с использованием единого параметра закрутки (рис. 2). При этом для каждого канала устанавливалось соответствие между наклоном наружной стенки $\gamma_1/2$ и оптимальной закруткой S, соответствующей минимуму потерь,

$$S = \frac{\int_r^R c_a c_u r^2 dr}{R\int_r^R c_a^2 r dr}, \quad (1)$$

где r, R — соответственно внутренний и наружный радиусы закручивающей решетки;

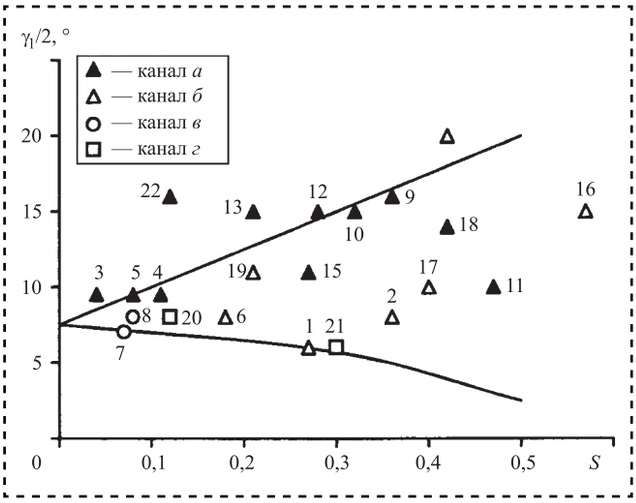

Рис. 2. Обобщенная характеристика диффузоров [2] с положительным наклоном обеих стенок (*а*), цилиндрической внутренней стенкой (*б*), отрицательным наклоном внутренней стенки (*в*) и конических (*г*) (цифрами обозначены данные таблицы)

c_a и c_u — среднее значение осевой и окружной скоростей соответственно (см. рис. 1).

Верхняя линия на рис. 2 определяет положение "жидкой" границы основного течения для режима свободного расширения вихря. Нижняя линия обозначает переход к режиму разрушения вихря.

На основании анализа данных отечественных и зарубежных исследователей, приведенных в таблице, оценивалось изменение закрутки потока в переходном канале в зависимости от геометрических параметров канала. Тип закрутки во входном и выходном сечениях каналов определялся из анализа распределения скоростей и углов потока в этих сечениях.

Изменение закрутки при течении закрученного потока в каналах определялось как разность углов по входу и выходу:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2. \quad (2)$$

Положительные значения $\Delta\alpha$ соответствуют выравниванию потока (приближению к осевому направлению), а отрицательные — дополнительному закручиванию (см. рис. 1).

Для исследуемых диффузоров определялся эквивалентный угол раскрытия

$$\gamma_{экв} = 2\mathrm{arctg}\left[\frac{q-1}{2L/h_1}\right], \quad (3)$$

где q — диффузорность канала; L/h_1 — относительная длина канала.

sb815.indd 4 27.07.2015 15:01:09

Характеристики исследуемых диффузоров

Номер точки	$\gamma_1/2$, °	q	L/h_1	$\Gamma_{экв}$, °	Тип закрутки на входе	S_{opt}	Тип закрутки на выходе	Изменение закрутки в канале $\Delta\alpha/\alpha_1$	Исследователи
1	6	4,7	9,0	23	*б*	0,27	—	—	Y. Senoo, N. Kawaguchi
2	8	4,7	9,0	23	*б*	0,36	—	—	Y. Senoo, N. Kawaguchi
3	9,5	1,9	5,4	9,4	*а*	0,04	*а*	−0,28	А.Е. Ремизов, О.О. Карелин
4	9,5	2,2	5,4	12,7	*г*	0,11	*б*	−0,20	А.Е. Ремизов, О.О. Карелин
5	9,5	1,9	5,4	9,4	*б*	0,08	*б*	−0,20	А.Е. Ремизов, О.О. Карелин
6	8	2,1	6,5	9,7	*б*	0,18	*б*	0	С.А. Довжик, В.М. Карта-венко
7	7	1,6	—	—	—	0,07	—	—	Д.В. Гуревич
8	8	2,3	4,7	13	*б*	0,08	*в*	−0,11	T. Kanemoto, T. Kubota
9	16	3,47	—	—	–	0,36	—	—	B. Djebedjian, J. Renaudeaux
10	15	2,94	11,0	12	*а*	0,32	*а*	−0,20	B. Djebedjian, J. Renaudeaux
11	10	1,5	5,0	5,7	*в*	0,47	*в*	0	R. Lohmann, S. Markowski
12	15	2,17	7,6	8,8	—	0,28	—	—	D. Japikse
13	15	3	10,0	14	*а*	0,21	*в*	−0,27	N. Kumar
14	20	1,85	1,7	22	*г*	0,42	*а*	−0,27	O. Sieker, J. Seume
15	11	4	—	—	—	0,27	—	—	V. Kumar
16	15	2,5	3,6	23	*б*	0,57	—	—	H. Abdalla
17	10	1,21	1,2	10	*б*	0,40	*б*	0	Ю.В. Лач
18	14	1,21	1,2	10	—	0,42	–	−0,13	В.А. Черников
19	11	1,77	3,0	15	—	0,21	*а*	−0,17	В.А. Черников
20	8	2,4	—	—	*г*	0,12	*б*	0	C. Hah
21	6	1,86	—	—	*а*	0,30	*а*	0,25	N. Cho, C. Fletcher
22	16	3,56	6,5	22	*д*	0,12	*г*	−0,31	Е.М. Левин, Г.И. Захарчук

sb815.indd 5 27.07.2015 15:01:09

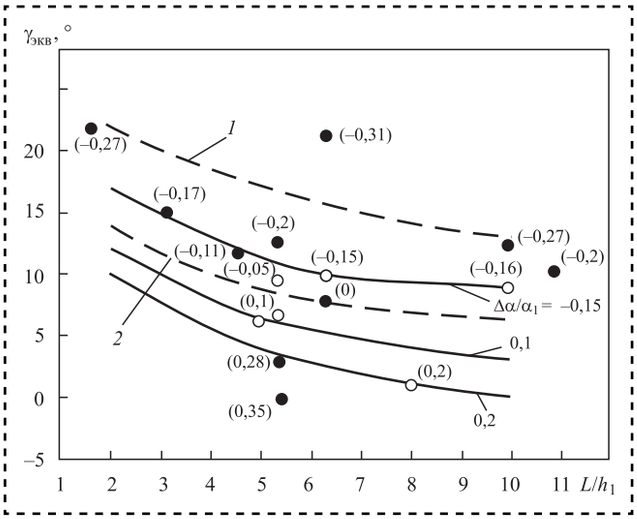

Рис. 3. Характеристика исследуемых диффузоров:
1 — линия максимальных коэффициентов восстановления давления в диффузорах; 2 — граница начала отрыва в кольцевых диффузорах; ○ — данные [1]; ● — новые данные (в скобках показано относительное изменение угла в канале $\Delta\alpha/\alpha_1$)

На основании этих данных дополнена характеристика по изменению углов пока по длине диффузора от эквивалентного угла раскрытия (рис. 3), полученная авторами ранее [1]. Полученные данные хорошо согласуются с данными [1], дополняя их.

На рис. 3 представлены изолинии по геометрическим параметрам диффузоров, соответствующие постоянному изменению угла потока в диффузоре. Эти изолинии описываются полиномами

$$\gamma_{\text{экв}} = a\left(L/h_1\right)^2 + b\left(L/h_1\right) + c, \qquad (4)$$

причем коэффициенты a и b отличаются не более чем на 5 %. Поэтому все семейство изолиний можно описать одним уравнением

$$\gamma_{\text{экв}} = 0{,}13\left(L/h_1\right)^2 - 2{,}7\left(L/h_1\right) + c. \quad (5)$$

Из (5) можно определить коэффициент c:

$$c = \gamma_{\text{экв}} - 0{,}13\left(L/h_1\right)^2 + 2{,}7\left(L/h_1\right). \quad (6)$$

При этом между изменением угла и коэффициентом c, определяющим положение изолинии (рис. 4), существует зависимость, описываемая выражением

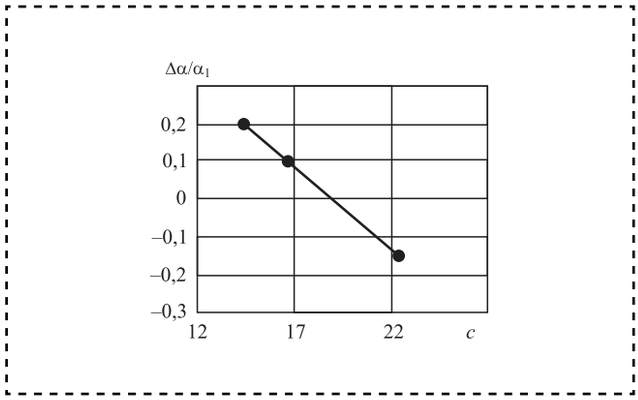

Рис. 4. Зависимость изменения угла потока от коэффициента *c*

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha_1} = -0{,}04c + 0{,}84. \quad (7)$$

Полученные зависимости могут оказаться полезными при определении относительного изменения угла в диффузоре по геометрическим параметрам $\gamma_{\text{экв}}$ и L/h_1.

Данные таблицы использовали для представления изменения закрутки потока в диффузорах в зависимости от параметров $\gamma_1/2$ и S_{opt}.

На рис. 5 представлены изолинии по параметрам $\gamma_1/2$ и S_{opt}, соответствующие постоянному изменению угла потока в диффузоре. Эти изолинии описываются следующими выражениями:

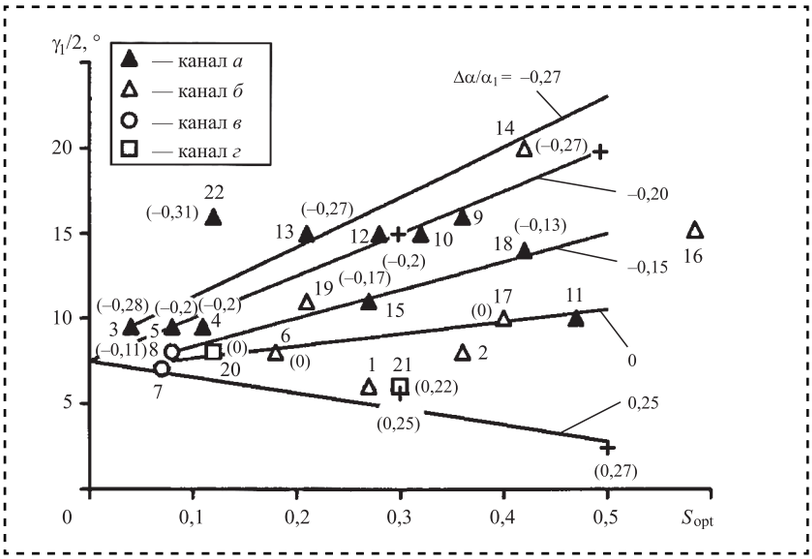

Рис. 5. Изменение закрутки в исследуемых диффузорах (в скобках указано относительное изменение закрутки в канале $\Delta\alpha/\alpha_1$)

sb815.indd 6 27.07.2015 15:01:09

$$\Delta\alpha \quad /\alpha_1 = -0{,}27: \ \gamma_1/2 = 29{,}3S_{opt} + 8{,}3; \quad (8)$$

$$\Delta\alpha \quad /\alpha_1 = -0{,}20: \ \gamma_1/2 = 25S_{opt} + 7{,}5; \quad (9)$$

$$\Delta\alpha \quad /\alpha_1 = -0{,}15: \ \gamma_1/2 = 16{,}7S_{opt} + 6{,}7; \quad (10)$$

$$\Delta\alpha \quad /\alpha_1 = 0: \ \gamma_1/2 = 7{,}1S_{opt} + 6{,}9; \quad (11)$$

$$\Delta\alpha \quad /\alpha_1 = 0{,}27: \ \gamma_1/2 = -9{,}7S_{opt} + 7{,}8. \quad (12)$$

Достоверность аппроксимации с использованием критерия Пирсона составляет 0,95.

Как отмечалось выше, для обеспечения аэродинамической эффективности диффузора с закруткой потока необходимо назначение геометрических параметров и входной закрутки, при которых обеспечивается свободное расширение потока. Выражения (8)—(12) позволяют оценить изменение закрутки потока в проектируемом переходном канале при назначении рациональных параметров $\gamma_1/2$ и S_{opt}.

Выводы

1. Получена обобщенная база данных по характеристикам диффузоров с классификацией каналов по конфигурации, величине и типу закрутки.

2. На основании анализа данных по характеристикам диффузоров получены выражения, позволяющие оценить изменение закрутки потока в проектируемых переходных каналах при выборе рациональных геометрических параметров каналов и входной закрутки.

Полученные данные полезны при предварительном проектировании турбин с переходным каналом.

Библиографический список

1. **Ремизов А.Е., Кривошеев И.А., Карелин О.О., Осипов Е.В.** Геометрические и аэродинамические характеристики межкаскадных переходных каналов авиационных ТРДД и энергетических ГТУ. М.: Машиностроение, 2012. 271 с.

2. **Ремизов А.Е., Карелин О.О.** Анализ процесса расширения закрученного потока применительно к задачам проектирования переходных каналов ГТД // Вестник РГАТУ. 2015. № 5 (32).

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

☑ *За наличный и безналичный расчет.*
☑ *С любого номера и на любой срок.*
☑ *Без почтовых наценок.*

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
тел.: (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

sb815.indd 7 27.07.2015 15:01:10

УДК 658.512

Р.Х. Ахатов, *канд. техн. наук,* **М.В. Лаврентьева**
(Иркутский государственный технический университет)
E-mail: axatob@istu.edu, mira.amazon@gmail.com

Распознавание конструктивно-технологического состава изделия по его электронной модели*

Рассмотрена методика автоматизированного определения конструктивно-технологического состава изделия. Использована система распознавания электронного макета конструкции типового изделия по его геометрическим параметрам.

This article describes a method for the automated determination of constructive-technological composition of the product. Use the system of recognition of electronic model constructions standard products by its geometrical parameters.

Ключевые слова: машиностроение, конструктивно-технологический анализ, CAD/CAE-системы, распознавание образов.

Keywords: mechanical engineering, construction and technological analysis, CAD/CAE-systems, artifical cognition.

Введение

Распознавание образов представляет собой важный инструмент различных приложений, позволяющий различать машинописные или рукописные символы, походку человека, лицо, речь, жест, цифровой отпечаток и т. д.

В настоящее время широкое распространение CAD/CAM/CAE-систем позволяет использовать систему распознавания образов при работе с электронными моделями, что может существенно сократить время выполнения многих конструкторских и технологических задач.

Созданная в CAD-системе геометрическая модель изделия не содержит семантическую информацию, необходимую для принятия ряда проектных решений [1]. В связи с этим возникает необходимость структуризации (конструктивно-технологического анализа) значимой для конкретного прикладного применения геометрической информации об изделии.

Конструктивно-технологический анализ машиностроительного изделия производится специалистом для решения многих задач, в частности для выявления наиболее рационального метода базирования, разработки технологического процесса сборки и разработки конструкции сборочного приспособления.

Рассмотрение состава конструктивных элементов детали дает возможность судить о технологичности и степени рациональности конструктивного решения изделия в целом. Грамотно проведенный конструктивно-технологический анализ изделия является одним из основных факторов, определяющих способ базирования и компоновку сборочного приспособления данного изделия.

Средства программного расширения функционала современных CAD-систем дают возможность переложить функцию выявления основных конструктивно-технологических параметров на интеллектуальные системы обработки данных, в основе которых заложены системы распознавания образов.

Постановка задачи

При разработке технологического процесса сборки и методов формализации процедур в условиях автоматизированного проектиро-

* Работа проведена в рамках комплексного проекта 2012-218-03-120 "Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе Научно-производственной корпорации "Иркут" с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета" согласно Постановлению Правительства Российской Федерации № 218 от 9 апреля 2010 г.

sb815.indd 8 27.07.2015 15:01:10

вания сборочной оснастки в самолетостроении основной задачей является автоматизация выявления параметров, необходимых для проведения качественного конструктивно-технологического анализа как отдельных деталей (первый уровень) так и сборочной единицы в целом (второй уровень), для последующей разработки компоновочной схемы сборочной оснастки (третий уровень) с использованием систем распознавания образов.

Система распознавания образов — автоматическая система, которая стремится отнести исходный образ к определенному классу. Это происходит посредством решения двух последовательных задач:

анализ (или описание), который определяет параметры изучаемого образа;

классификация (или распознавание), которая позволяет распознать объект (образ), используя параметры, полученные в результате решения первой задачи.

Распознавание графических объектов происходит посредством выделения геометрии линий контура распознаваемого образа и сравнения его с данными, предварительно заложенными в базе (классификации образа) (рис. 1). Другими словами, анализ образа позволяет выбрать необходимый и достаточный состав параметров изделия для конкретного проектного приложения, описания и представления его, вместо того чтобы использовать сам образ [2].

Система классификации в таком случае основана на существующих стандартах и экспертных данных, что, в свою очередь, определяет набор уже классифицированных образов. Такую систему обучения называют контролируемым изучением (обучение с учителем). При этом разделение на классы осуществляется на основе постоянства параметров, т.е. данных, извлеченных из образа, необходимых и достаточных для достоверной идентификации образа.

Эту систему противопоставляют бесконтрольному (без учителя) обучению. При этом для системы отсутствует предварительная информация о классах.

Метод классификации обычно основан на доступности набора данных обучения, который является рядом уже классифицированных образов. Следовательно, независимо от выбора метода обучения системы на эффективность и надежность распознавания объектов влияет выбор входящих характеристик.

Для осуществления такого выбора для решения задачи первого уровня (распознавание детали) необходимо:

1) определить значение параметров каждого конструктивного элемента (количество линий, их виды и размеры);

2) выявить связи и отношения (определить связанные, параллельные, перпендикулярные, пересекающиеся линии);

3) разделить конструктивные элементы по исходным данным (тип детали, конструкция элементов, геометрия элементов);

4) распознать конструктивный элемент (сравнить с прототипом (образом) в классификаторе);

5) распознать структуру детали с учетом экспертной составляющей.

Для решения задачи второго уровня (распознавание сборочной единицы) необходимо:

1) определить все сопрягаемые поверхности;

2) задать иерархическую последовательность связей деталей в сборочной единице;

3) идентифицировать элементы конструкции изделия (определить тип входящих деталей, конструктивные элементы, являющиеся сопрягаемыми для каждой детали, геометрию элементов).

Выявленные свойства изделия позволяют решить задачу третьего уров-

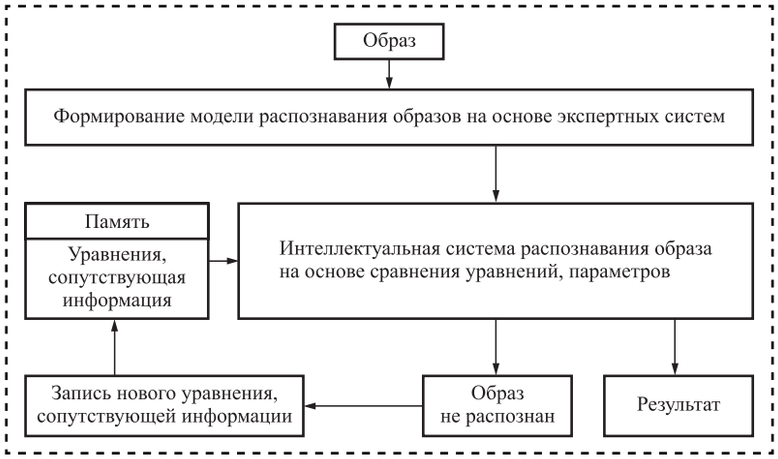

Рис. 1. Структура системы распознавания образов

sb815.indd 9 27.07.2015 15:01:10

ня — на основе данных анализа, полученных на первом и втором уровне, построить структуру сборочной оснастки, для которой будут определены необходимые габаритные размеры каркаса, рабочая высота всего сборочного приспособления, количество, тип и место расположения базово-фиксирующих элементов, их иерархическая вложенность и другие параметры.

В идеале использование данного метода позволит взять на себя большую часть рутинных операций по проектированию сборочного приспособления, поскольку освободит конструктора от необходимости проводить анализ каждой детали, входящей в изделие, для которого требуется разработка сборочного приспособления; определять габариты и тип установочных и несущих элементов; частично формировать набор базирующих и фиксирующих элементов [3]. При этом метод требует наличия только электронного макета изделия [4] и позволяет избежать ошибок, вызванных человеческим фактором, а также унифицировать конструкцию сборочного приспособления.

Метод решения

Здесь идет речь о реализации задачи первого уровня, т.е. анализе и распознавании входных данных отдельной детали.

Суть данного метода заключается в том, что разработанный электронный макет анализируется по составу и свойствам элементов, ограничивающих контуры всех поверхностей детали. Из таких контуров можно вычленить все конструктивно-технологические особенности, оказывающие влияние на последующие процессы сборки и проектирования сборочной оснастки.

Поскольку анализ ведется на основе разработанного электронного макета, на первоначальном этапе деталь является лишь набором линий с неопределенными связями и точек их пересечения. Априори известно, что все линии связаны, так как принадлежат одной детали. Необходимо определить виды этих связей.

Однако, как было сказано ранее, созданная в CAD-системе модель содержит только геометрическую информацию об изделии, без семантического содержания. Это означает, что распознавать элементы конструкции на первом уровне можно, опираясь лишь на геометрические признаки. Для этого разработан набор экспертных правил, в которых прописана последовательность процедур извлечения параметров, необходимых для дальнейшего распознавания каждого конструктивного элемента детали.

1. Определить типы линий (*arc*, *line*, *curve*).

Линии разделяются на прямые, которым присвоено значение *line*, кривые — *curve*, окружности замкнутые — *circle* и дуги — *arc*.

2. Определить точки ограничения и сопряжения (пересечения) линий.

Определяются точки, ограничивающие линию (точки начала-конца), и конструктивные элементы, для которых эти точки являются совпадающими.

3. Определить необходимые проекции.

Для однозначного определения конструктивного элемента в большинстве случаев необходимо рассмотреть контур в различных проекциях. Для некоторых изделий набор линий может состоять из нескольких комплектов.

4. Определить размеры линий.

В зависимости от типа линий определяются числовые параметры: длина, диаметр, радиус, количество сегментов сплайна.

5. Определить тип и форму поверхности детали или совокупности фрагментов поверхности (плоская, цилиндрическая, коническая, двойной кривизны).

6. Определить базовый конструктивный элемент.

Базовый конструктивный элемент характеризуется превосходящими габаритными размерами, наибольшим количество связей с другими конструктивными элементами, отсутствием связей с висячими вершинами, а также является платформой для остальных конструктивных элементов, входящих в состав детали.

7. Определить наличие отверстий, вырезов, окон для сплошной/несплошной поверхности.

8. Вложенность (принадлежность) конструктивных элементов (геометрия одного зависит от геометрии другого). Вложенные конструктивные элементы — это элементы, существование которых невозможно при отсутствии какого-либо основного элемента.

sb815.indd 10 27.07.2015 15:01:10

9. Расположение конструктивных элементов относительно друг друга и всех относительно базового.

Применительно к конкретным программным продуктам, таким как NX (Siemens PLM Software) [6], координаты точек всех линий известны, и вопрос расположения конструктивных элементов детали друг относительно друга решается извлечением этих координат из графической среды и их пересчетом в различные системы координат при помощи аффинного преобразования.

Пусть M (вся деталь) — множество образов в данной задаче. При этом каждый элемент множества — это отдельный образ (конструктивный элемент), который обозначим a_i.

Каждый конструктивный элемент a_i описан множеством

$$A_i = \{x_1, x_2, ..., x_j\}, \quad (1)$$

где x_j — элемент, определяющий контур, ограничивающий поверхность конструктивного элемента. На данном этапе x_j — геометрические элементы, которые относятся к определенному типу n и характеризуются конкретным числом параметров и их значений $\{t_1, t_2, ..., t_q\} = X$.

Таким образом, для определения конструктивного элемента (образа) на данном этапе достаточно выявить его типовые идентифицирующие геометрические элементы (линии, точки) x_j в n-мерном пространстве параметров L^n. Как правило, пространство параметров L^n разбито на p областей. Каждая область содержит точки, однозначно принадлежащие лишь одному конструктивному элементу.

Для распознавания объекта необходимо определить область $\{M_p\}$ пространства L^n, используя множество $X' = \{t_1, t'_2, ..., t'_n\}$ образов, чья принадлежность какому-либо типу конструктивных элементов Ω_i известна. То есть x'_j представляет собой прототип, по которому будет происходить распознавание образов (обучение с учителем). Для этого формируется библиотека, где для предварительно выявленных типов конструктивных элементов определены комплексы идентифицирующих параметров (состав и структура элементов, ограничивающих контур, типовые диапазоны значений параметров каждого элемента контура и др.).

При условии, что описание x_i попадает в область $\{M_p\}$ пространства L^n, соответствующего определенному a_i, можно сделать вывод, что образ относится к этому конструктивному элементу.

Таким образом, задача распознавания сводится к построению границ областей p, разделяющих конструктивные элементы, в известном множестве параметров. Для этого существуют разделяющие функции $f_1(x)$, $f_2(x)$, ..., $f_p(x)$, т.е. в условиях $f_p(x) > f_j(x)$, где $p \neq j$, образ x_j принадлежит a_i. Когда все разделяющие границы между конструктивными элементами определены, и каждый образ x_j отнесен к тому или иному конструктивному элементу, распознавание можно считать завершенным.

На примере фрагмента нервюры крыла самолета (рис. 2, *а* на стр. 2 обложки) показан алгоритм распознавания.

При рассмотрении стенки нервюры выделяется совокупность линий контуров, ограничивающих поверхности данной детали (рис. 2, *б* на стр. 2 обложки).

В конструкцию деталей планера самолета входят характерные конструктивные элементы, такие как стенки, борта, отверстия, отбортовки, подсечки. Для того чтобы выделить эти конструктивные элементы, применяются правила, которые определяют, в какой последовательности, при каких условиях должны быть соединены линии для каждого конструктивного элемента.

Таким образом, получаем иерархическую систему классификации на примере стенки нервюры (рис. 3).

В первую очередь определяется базовый конструктивный элемент. В данном случае это стенка, так как согласно приведенным выше правилам как минимум две линии, лежащие в одной плоскости, образуют замкнутый контур, размеры которого в совокупности превышают размеры каждого отдельного конструктивного элемента. Стенка будет являться основой для расположения остальных конструктивных элементов, поскольку геометрически связана с каждым из них. Контуры остальных конструктивных элементов так же представлены набором ограничивающих линий (прямых, дуг, сплайнов), идентичных для каждого.

sb815.indd 11 27.07.2015 15:01:10

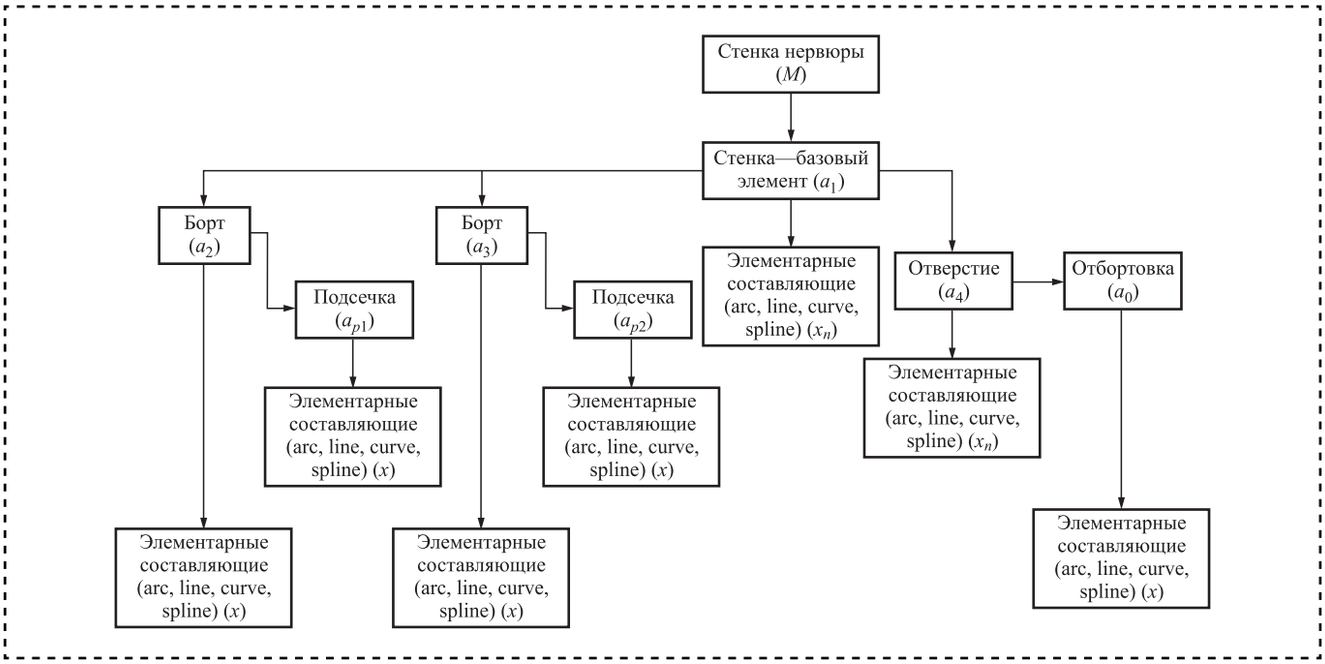

Рис. 3. Иерархическая схема распознавания нервюры

Например, на рис. 4, 5 (на стр. 2 обложки) представлены изометрические проекции фрагмента стенки нервюры. Первоначально необходимо определить пространство параметров, где a_i обозначают конструктивные элементы, x_{cj} (кривые) и x_{lj} (прямые) — линии, принадлежащие им, x_{arcj} — дуги, x_{pj} — точки:

$$x_{c1} \in a_2;$$

$$x_{c4} \in a_3;$$

$$a_4 \in a_1.$$

Одна и та же линия или точка может принадлежать разным конструктивным элементам, образуя пересечение объектов и, соответственно, формируя связь между ними:

$$x_{c2} \in a_1,\ a_2 \to a_1 \cap a_2;$$

$$x_{c3} \in a_1,\ a_3 \to a_1 \cap a_3;$$

$$x_{p2} \in a_4 \to x_{p2} \cap a_1;$$

$$x_{l1} \in a_2;\ x_{l2} \in a_2;\ x_{arc1} \in a_2;$$

$$x_{l4} \in a_3;\ x_{l3} \in a_3;\ x_{arc2} \in a_3.$$

Строго говоря, борт — это твердое тело, у которого есть ограничивающие поверхности. Линия x_{c1} — это не линия, ограничивающая борт, как таковая, а линия, ограничивающая внутреннюю поверхность борта (см. рис. 4 на стр. 2 обложки). Но с точки зрения распознавания характер противоположной поверхности на данный момент не определен. Значит, это может быть не борт, а, например, граница кармана, если торцевая поверхность будет иметь предельную толщину листовой детали.

Следовательно, для увеличения точности распознавания, уточнения состава (и значений) параметров элементов, ограничивающих контур, для характеристики конкретного конструктивного элемента необходимы дополнительные связи (см. рис. 5 на стр. 2 обложки):

$$x_{p3} \in x_{c1},\ x_{l1};$$

$$x_{p4} \in x_{l1},\ x_{l2};$$

$$x_{p5} \in x_{l2},\ x_{arc1};$$

$$x_{p6} \in x_{arc2},\ x_{l3};$$

$$x_{p7} \in x_{l3},\ x_{l4};$$

$$x_{p8} \in x_{c4},\ x_{l4}.$$

sb815.indd 12 27.07.2015 15:01:10

Таким образом, образовавшиеся связи демонстрируют принадлежность ограничивающих линий к определенному контуру, а полученных контуров — одному объекту:

$$x_{c1} \cap x_{l1} \cap x_{l2} \cap x_{arc1} \cap x_{arc2} \cap x_{l3} \cap x_{l4} \cap x_{c4};$$

$$x_{p1} \in x_{arc1}, x_{arc2}, x_{c2}, x_{c3} \rightarrow a_1 \cap a_2 \cap a_3.$$

Из множества образов M в данной задаче распознавания представляют интерес геометрические элементы x_j, принадлежащие определенному конструктивному элементу a_i (подмножеству A_i), см. формулу (1)). Задан критерий $V(A_i)$, позволяющий отличать объекты друг от друга в соответствии с условиями сходимости. Например, такой критерий может определять типы и количество связанных между собой линий.

Считается, что множество конструктивных элементов $M = \{a_1, a_2, \ldots, a_i\}$ является конечным, а конструктивные элементы образуют полную группу подмножества из M (разбиение пространства образов M_p):

$$\bigcup_{i=1}^{m} A_i = M \text{ и } A_i \cap A_j = \varnothing, \ i \neq j.$$

Требуется в соответствии с заданным критерием V построить разбиение множества M на типы конструктивных элементов Ω_i. Действие критерия в этом случае определяется следующим выражением:

$$M = \bigcup_{i=0}^{k} \Omega_i.$$

$$\forall i, j\,(i, j = 1, \ldots, k)\ i \neq j \Leftrightarrow V\left(A_i \in \Omega_i\right) \neq \left(A \in \Omega_j\right).$$

Тем самым классификация не только распределяет объекты по типам конструктивных элементов, но и определяет их количество k.

Рассмотрим подробно цепочку распознавания на отдельно взятом конструктивном элементе "борт" (рис. 6).

На рис. 6 обозначены: S — толщина материала; r — радиус скругления; *arc*, *line*, *curve* — типы линий.

На основе полученных данных формируются экспертные правила для данного классификационного образа:

1) толщина материала одинакова для всего изделия (можно не учитывать на первом уровне);

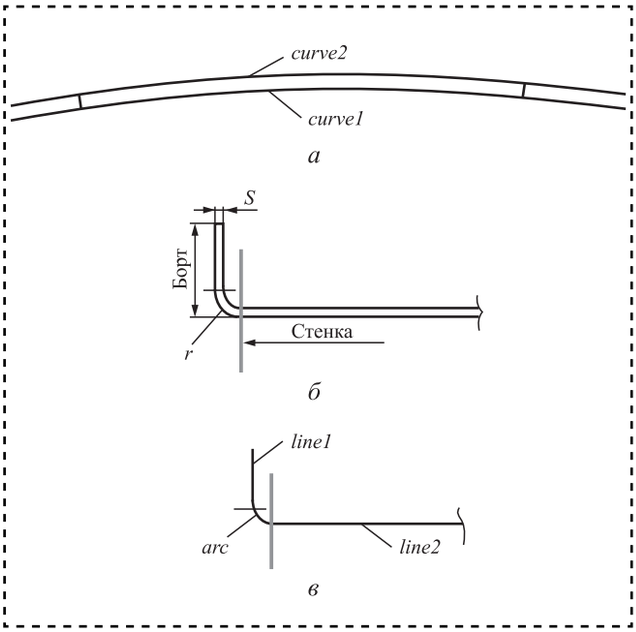

Рис. 6. Набор параметров элемента "борт":
а — контур, ограничивающий поверхность борта, первая проекция; *б* — контур, ограничивающий поверхность борта, вторая проекция; *в* — элементарный контур, расчлененный на составляющие типы линий

2) число линий всегда равно двум; одна из линий — обязательно *arc*;

3) *curve* 1 всегда повторяет контур *curve* 2 (см. рис. 6, *а*);

4) *arc* всегда имеет общую точку начала (конца) с линией стенки борта (*line* 1) (рис. 6, *б*);

5) *arc* всегда имеет общую точку начала (конца) с линией стенки детали (*line* 2) (см. рис. 6, *б*);

6) *line* 1 всегда меньше *line* 2 (см. рис. 6, *б*);

7) *line* 1 расположена под углом, не равным нулю или 180° к *line* 2 (см. рис. 6, *в*).

Данные правила представляют собой предикаты, позволяющие построить логическое уравнение, где истинное значение-высказывание определяет принадлежность контура классифицируемому образу.

Как видно из набора правил, распознавание каждого конструктивного элемента не обособлено и происходит, как правило, последовательно, реже — параллельно для конструктивных элементов, которым можно присвоить статус "вложенных".

Так, "вложенным" конструктивным элементом борта являются подсечки (рис. 7).

Подсечка — это углубление на борте детали, сделанное с таким расчетом, чтобы другая

sb815.indd 13 27.07.2015 15:01:10

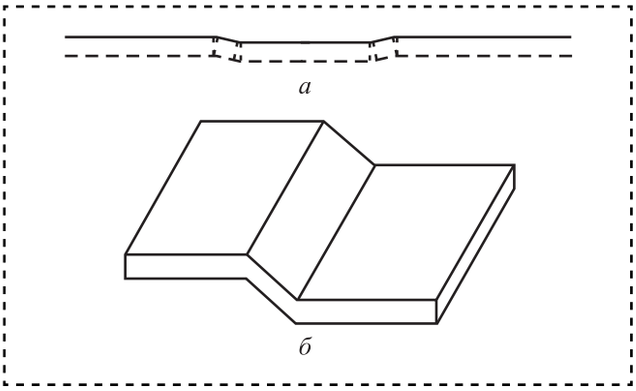

Рис. 7. Контуры подсечки:
а — первая проекция; *б* — вторая проекция

наложенная в этом месте деталь находилась на одном уровне с поверхностью борта.

Таким образом, подсечки не существует, если у детали отсутствует борт, однако, несмотря на то что эта зависимость является односторонней, эти конструктивные элементы будут взаимоопределяющими. То есть при разложении контура борта на составляющие контур подсечки будет определяться автоматически, тем самым подтверждая, что конструктивный элемент, которому принадлежит подсечка, является бортом.

Использование метода разложения контура на геометрические составляющие позволяет проанализировать и распознать детали и находящиеся в их составе конструктивные элементы любой конфигурации, что послужит платформой для последующей работы со сборочной единицей на втором уровне конструктивно-технологического анализа.

Заключение

Применение систем распознавания трехмерных объектов значительно повысит эффективность производства путем унификации решения конструктивных и технологических задач и послужит основой для развития интеллектуальных систем поддержки принятия решений различной направленности в пределах отрасли.

Значительные преимущества по сравнению с традиционным методом проектирования состоят в следующем:

повышается качество принимаемых решений;

сокращается длительность цикла проектирования;

снижается трудоемкость проектирования.

Данная методика универсальна и может быть применима к изделию не только авиационного, но и общемашиностроительного комплекса (при замене базы данных и базы правил).

Библиографический список

1. **Говорков А.С., Жиляев А.С.** Информационная модель проектируемой конструкции изделия планера самолета // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6 (2). С. 335—338.
2. **Лаврентьева М.В., Чьен Х.В.** Автоматизированное проектирование электронных макетов элементов сборочной оснастки посредством программного модуля NX/Open API // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6 (2). С. 395—399.
3. **Ахатов Р.Х., Чьен Х.В.** Выбор опорных базовых точек при определении схемы базировании сборочной единицы // Вестник МАИ. 2013. Т. 20. № 3. С. 110—118.
4. **ГОСТ 2. 052—2006.** Единая система конструкторской документации Электронная модель изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2006.
5. **Официальный** сайт компании Siemens PLM Software (UGS) [Электрон. ресурс]. URL: http://www.plm.automation.siemens.com. Computer-aided design models of electronic components assembly tooling through program modules NX / Open API.

sb815.indd 14 27.07.2015 15:01:10

УДК 621.88.084

М.А. Степанова *(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))*
E-mail: marya.stepanova.argon@mail.ru

Соединения типа press-fit *(аналитический обзор)*

Рассмотрены с оединения, в ыполняемые з апрессовкой. О писаны п реимущества д анного типа соединений, основы образования контакта. Перечислены о бласти п рименения с оединений типа press-fit.

This article presents solderless connections, press-in connections. Its of contact formation and application fields of this type of connections are given.

Ключевые слова: непаяные соединения, печатные платы, авионика, соединения запрессовкой.

Keywords: so lderless co nnections, p rinted c ircuit boards, avionics, press-fit connections.

При конструировании электронной аппаратуры большое внимание уделяется проблеме надежности соединений. Непаяные соединения появились вследствие невозможности применения пайки в некоторых случаях, а также из-за проблем, вызванных применением припоя. К данному типу соединений относятся и соединения, выполняемые запрессовкой (рис. 1).

Соединения типа *press-fit* за десятилетия использования доказали свою надежность. Прессовые соединения сегодня используются во всех областях электроники.

Прессовые соединения имеют следующие преимущества перед паяными:

герметичная благодаря эффекту холодной сварки зона контакта (поэтому соединение более качественное);

высокая надежность соединения после климатических испытаний, которые обычно ослабляют паяные соединения;

постоянное контактное сопротивление;

компенсация погрешностей при изготовлении сквозных металлизированных отверстий;

отсутствие высокотемпературных воздействий на печатную плату;

отсутствие газовых выделений и остатков флюса;

нет необходимости в последующей промывке платы благодаря чистоте процесса;

исключение вероятности возникновения коротких замыканий благодаря отсутствию мостиков припоя;

простота реализации соединений;

ремонтопригодность получаемых соединений и сохранность печатных плат;

возможность реализации соединений накруткой для разъемов с длинными контактами;

легкость переработки разъемов (можно просто разобрать соединение и извлечь золото);

существенная экономическая эффективность.

Благодаря перечисленным преимуществам технология запрессовки завоевала популярность во всем мире. В настоящее время она широко применяется и в России. Рассмотрим ее положительные и отрицательные стороны.

Метод запрессовки возник в связи с необходимостью монтажа многоконтактных соеди-

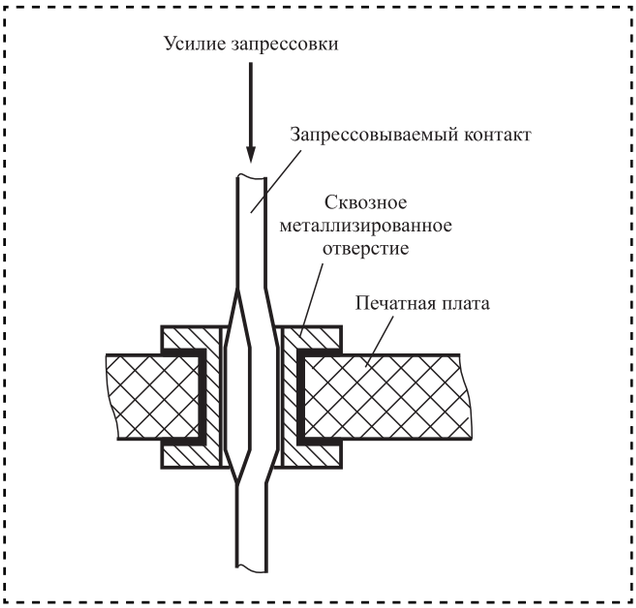

Рис. 1. Схема соединения, выполняемого запрессовкой

sb815.indd 15 27.07.2015 15:01:10

нителей на печатные платы, хвостовики выводов которых должны одновременно использоваться в качестве рабочей части штырей вилок или для накрутки проводов (эти хвостовики нельзя подвергать действию припоя).

Соединение запрессовкой, как можно догадаться из названия, выполняется путем впрессовывания контактов в металлизированные отверстия на печатной плате. Важно отметить, что та часть контакта, которая впрессовывается в отверстие, имеет диаметр, превышающий диаметр данного отверстия. Из-за разницы диаметров в результате впрессовывания происходит деформация или отверстия, или контакта, и именно вследствие деформации образуется соединение.

Соединения, выполняемые запрессовкой, еще не имеют официально утвержденного русскоязычного названия, так как до сих пор в России не существует никаких стандартов по этой технологии. Есть зарубежные стандарты, в которых дано описание этой технологии (немецкий стандарт DIN 41 612, часть 5 и международный стандарт IEC 60352-5). В литературе часто используется термин *press-fit* (от *press* — нажимать и *fit* — входить, заполнять). В стандарте IEC 60352-5 данный вид соединения носит название *press-in connection*.

Физические основы получаемого контакта

Если две контактирующие поверхности соединения прижаты друг к другу, то в действительности соприкасаются только несколько точек (металл к металлу), и эти же точки составляют зону электрического контакта (это также верно для отполированных поверхностей). Минимальный радиус такого микроскопического контакта металл—металл обычно равен 10 мкм.

В непаяных соединениях типа запрессовки всегда присутствует пластическая деформация на этих точках эффективного контакта в контактной зоне. Это происходит из-за высокого контактного давления, которое возникает потому, что сила макроскопического контакта приходится на маленькую зону микроскопического контакта.

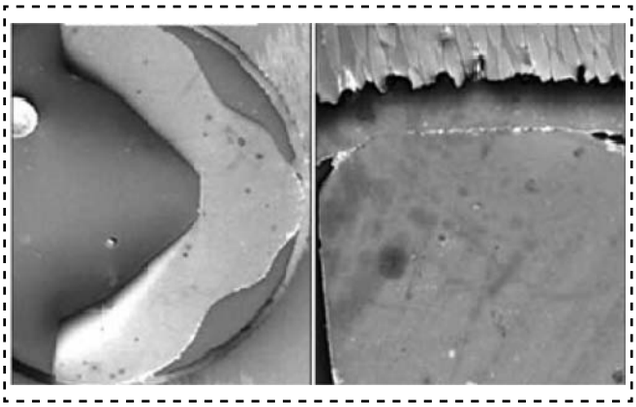

Рис. 2. Весь контакт (слева) и зона микроскопического контакта (справа)

Это означает, что две поверхности будут сливаться (рис. 2).

Таким образом, эффективная зона контакта увеличивается, и, что самое важное, создается зона газонепроницаемого контакта, а она является очень устойчивой к влиянию агрессивной среды.

Принцип соединения — хорошо известный эффект холодной сварки. Из-за пластической деформации двух контактирующих поверхностей вырабатываются свободные электроны. Связанное с металлом электронное облако связывает свободные электроны и соединяет их снова по тому же принципу, что и в базовом металле. Сила полученного соединения, конечно, ниже, чем в исходной решетке, но она увеличивается в течение первых часов соединения благодаря эффекту рекристаллизации (рис. 3).

Холодная сварка не подходит для отрывных контактов (например, склеивания контактов реле), но ее можно использовать для постоянных контактов, к которым часто предъявляются более высокие требования по надежности.

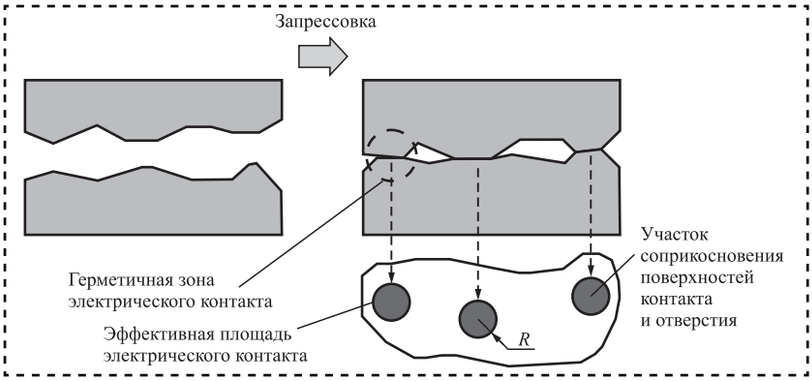

Рис. 3. Участки соприкосновения поверхностей контакта и отверстия

sb815.indd 16 27.07.2015 15:01:10

Общие сведения о соединениях

Покрытия. На каждой поверхности существуют покрытия из-за коррозий, органических отходов (например, жира) и других видов загрязнения, которые могут приводить к нарушению контакта. В данном случае наибольшие проблемы вызывают оксидные слои, возникающие вследствие коррозии.

Первый путь для преодоления такого рода проблем — покрытие поверхности благородным металлом. На поверхности благородных металлов слой коррозии не превышает 2 нм, он настолько тонок, что благодаря эффекту квантово-механического туннелирования осуществляется достаточный перенос тока.

На всех недрагоценных металлах слои коррозии могут достигать 5...100 нм и более. Для создания и поддержания контакта работают два механизма:

- так называемое спекание. При этом благодаря электрическому пробою при напряжениях, превышающих стандартные 20 мВ (в зависимости от толщины покрытия), большая часть коррозионного слоя сжигается. Этот метод подходит для слоев толщиной до 100 нм. Недостаток этого метода состоит в том, что при напряжениях ниже 20 мВ (как для сигналов или измерительных напряжений) спекания не происходит, и поэтому на практике большие контактные напряжения могут стать причиной больших проблем;
- разрушение ненужных покрытий в процессе формирования контакта. Слои коррозии могут быть разрушены достаточной силой контакта, как в соединениях типа press-fit. Данный метод лучше, так как он не требует покрытия из благородных металлов и является универсальным в применении, поскольку не имеет значения, какую электрическую функцию должен выполнять контакт. Минимальная сила, необходимая для разрушения коррозионных слоев, составляет 2 Н для каждой точки контакта.

Напряжение сжатия *Rc* является главной величиной и синонимом общей формулировки "контактное сопротивление". Для press-fit контактное сопротивление составляет приблизительно 0,05 МОм. В результате очень низкое сопротивление приводит к возникновению достаточно стабильного и высоконадежного соединения в сочетании с зоной безвоздушного контакта в технологии press-fit. И это также является причиной того, что соединение Press-fit может выдерживать очень большие токи по сравнению с другими видами соединений.

Разъедающая коррозия. В каждой конструкции на протяжении срока ее жизни происходят движения вследствие вибраций или из-за смещений тепловых циклов. Это также ведет к возникновению микроперемещений между контактирующими частями системы. Из-за относительно высоких сил удерживания в соединении press-fit реальные смещения в большинстве случаев незначительны.

Как бы то ни было, микроскопические смещения системы контакта должны учитываться в любом случае. Если поверхности соединителей покрыты благородным металлом, проблем с контактом не возникнет на протяжении всего жизненного цикла. Но из-за трения срок жизни покрытия в случае благородных металлов (в основном это золотое напыление толщиной <0,1 мкм) ограничен, поэтому иногда данная проблема просто переносится на более поздний срок.

Смещения системы контакта обычно составляют менее 10 мкм. В этом диапазоне зоны эффективного контакта при соединении типа press-fit сохраняются. В результате нет существенных изменений в значениях контактного сопротивления на протяжении всего срока жизни. Следовательно, в этом случае press-fit-контакт останется неизменным.

Если смещения превышают 10 мкм, то в большинстве случаев контактное сопротивление быстро возрастает до нескольких Ом.

Если периодическое смещение, которое происходит из-за периодического превышения силы удержания контакта, более 10 мкм, то оно приведет к ослаблению контакта в press-fit-соединении так, как было описано выше. В то же время ограниченное количество смещений длинного диапазона система press-fit выдержит.

Эффект заключается в том, что высокая сила удержания контакта может создавать новые зоны безвоздушного контакта после смещения. Кроме того, контакт может компенсировать некоторые смещения, явившиеся ре-

sb815.indd 17 27.07.2015 15:01:11

зультатом смещений при монтаже вследствие допустимых отклонений.

Таким образом, печатная плата может быть использована для нового press-fit-соединителя более одного раза (например, для доработки), и неисправный компонент может быть легко заменен. Однако из-за пластической деформации и допустимых отклонений контакт press-fit после извлечения из печатной платы нельзя использовать повторно.

Технология запрессовки

Как упоминалось выше, запрессовка — это процесс монтажа особым образом спрофилированного контакта в сквозное металлизированное отверстие печатной платы при условии, что диаметр (диагональный размер) запрессовываемого контакта больше диаметра сквозного металлизированного отверстия.

При реализации прессового соединения большую роль играют три фактора:

зона электрического контакта;

усилие электрического контакта;

усилие запрессовки.

Зона электрического контакта имеет особое значение. От нее зависит величина контактного сопротивления. Зона электрического контакта должна отвечать следующим требованиям:

быть большой;

оставаться постоянной в размерах;

обладать металлическим блеском;

не зависеть от изменений температуры, вибрации, а также различных манипуляций с запрессованным контактом.

Усилие электрического контакта F_n играет большую роль в получении прессового соединения (рис. 4):

$$F_n = F_a/(2f),$$

где F_a — усилие запрессовки; f — коэффициент трения между поверхностью контакта и внутренней поверхностью сквозного металлизированного отверстия.

Для поддержания надежного электрического контакта в отверстии усилие электрического контакта должно составлять 10 Н.

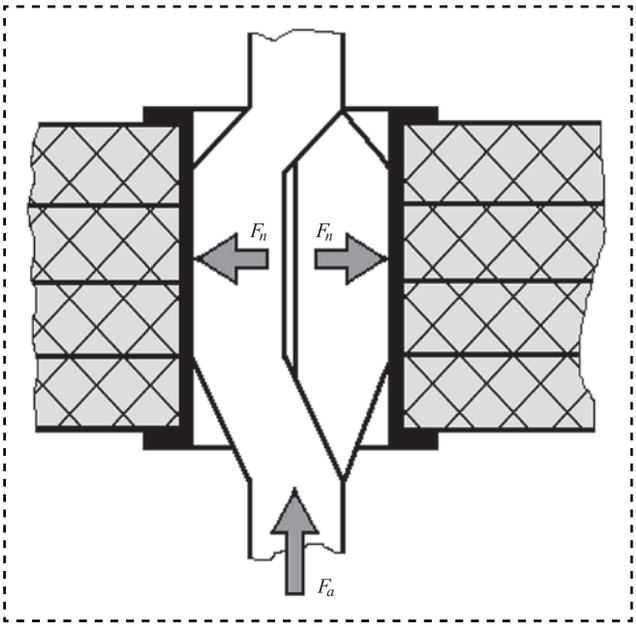

Рис. 4. Усилие электрического контакта

Усилие запрессовки. Согласно немецкому стандарту DIN 41 612 (часть 5) для надежного электрического соединения запрессовываемой части со сквозным металлизированным отверстием и достижения усилия, достаточного для удержания соединителя на печатной плате (даже без дополнительного его крепления винтами), минимальное усилие удержания запрессованного контакта в запрессовываемой зоне должно составлять 30 Н в отверстии 0,94...1,09 мм. При этом ограничений по максимальному усилию запрессовки контакта не предусмотрено. Однако для предотвращения изгиба контактов в процессе запрессовки и во избежание прикладывания неоправданно высоких общих усилий запрессовки их максимальное значение не должно превышать 150 Н на контакт.

Применение непаяных соединений, выполняемых запрессовкой

Стандарт IEC 352-5 предусматривает четыре уровня применения соединений, выполняемых запрессовкой. Данные уровни установлены для градации необходимого минимального усилия демонтажа запрессовываемого контак-

sb815.indd 18 27.07.2015 15:01:11

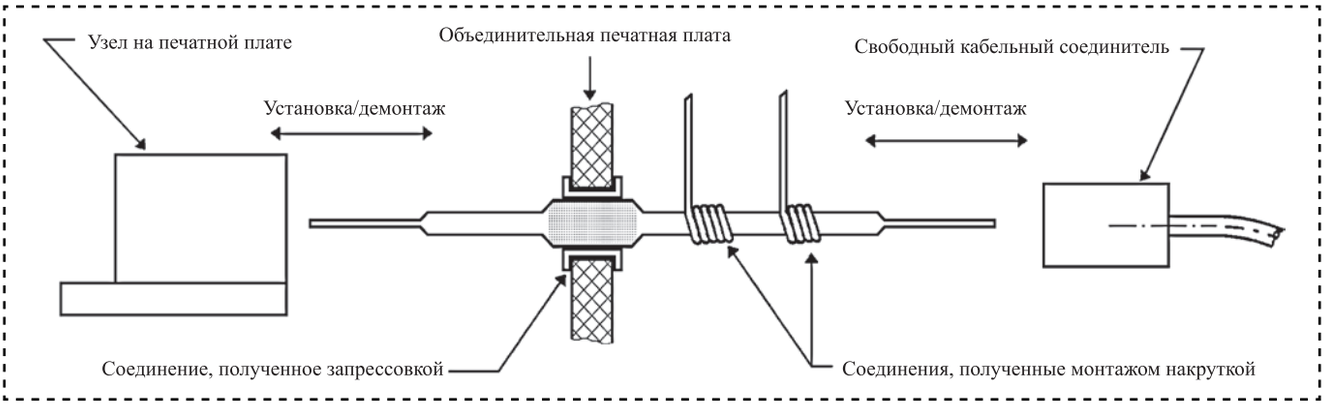

Рис. 5. Уровень применения соединений "*a*"

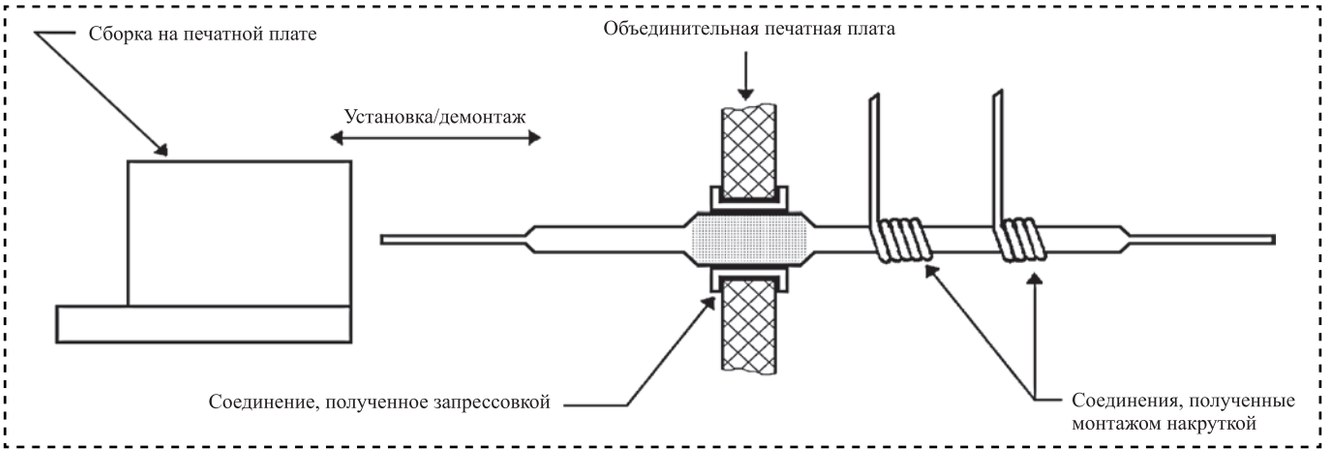

Рис. 6. Уровень применения соединений "*b*"

та при различных условиях практических напряжений.

Уровень применения "*a*" (рис. 5) определяет соединения, полученные запрессовкой и имеющие запрессовываемые контакты, подходящие для следующих случаев:

соединений, полученных монтажом накруткой;

установки/демонтажа сборок на основе печатных плат на стороне контактов, предназначенных для контактов соединителей (вилок или розеток);

установки/демонтажа свободного соединителя на конце, предназначенного для монтажа накруткой.

В случае уровня применения "*a*" усилие демонтажа должно составлять не менее 45 Н для номинальных диаметров 0,8...2 мм сквозного металлизированного отверстия в печатной плате.

Уровень применения "*b*" (рис. 6) определяет соединения, полученные запрессовкой и имеющие запрессовываемые контакты, подходящие для соединений, полученных монтажом накруткой, установки/демонтажа сборок на основе печатных плат на стороне контактов, предназначенных для контактов соединителей (вилок или розеток).

При этом усилие демонтажа должно составлять не менее 30 Н для номинальных диаметров 0,8...2 мм сквозного металлизированного отверстия в печатной плате.

Уровень применения "*c*" (рис. 7) определяет соединения, полученные запрессовкой и имеющие запрессовываемые контакты, подходя-

sb815.indd 19 27.07.2015 15:01:11

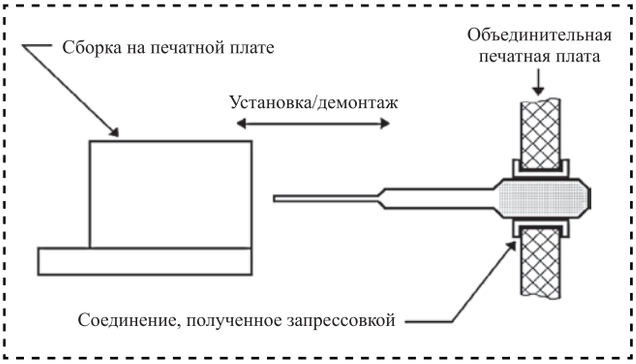

Рис. 7. Уровень применения соединений "*c*"

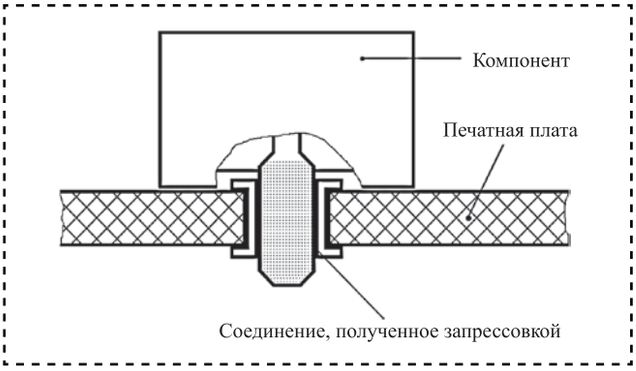

Рис. 8. Уровень применения соединений "*d*"

щие для установки/демонтажа узлов на печатных платах без какого-либо дополнительного проводного соединения. При данном уровне применения усилие демонтажа должно составлять не менее 25 Н для номинальных диаметров 0,8...2 мм сквозного металлизированного отверстия в печатной плате.

Уровень применения "*d*" (рис. 8) определяет соединения, полученные запрессовкой, в которых участвуют запрессовываемые контакты, являющиеся частью вывода компонента и предназначенные для фиксации компонента, например соединителя на печатной плате за счет использования запрессовки. В этом случае усилие демонтажа должно составлять не менее 20 Н для номинальных диаметров 0,8...2 мм сквозного металлизированного отверстия в печатной плате.

На практике наиболее популярной областью применения технологии запрессовки является производство объединительных плат. При этом запрессовка позволяет добиться максимального уровня эффективности технологического процесса.

Заключение

Запрессовка контактов в металлизированные отверстия печатных плат, получившая название press-fit, — это метод непаяного соединения, используемый в технологиях сборки электронных узлов и блоков в тех случаях, когда методы пайки не обеспечивают качественного соединения. В первую очередь это относится к сборке плат с большими массивами металла (медной фольги), не позволяющими прогреть плату до нужных температур, необходимых для качественного пропая.

Стандарт IEC 352-5 предусматривает четыре уровня применения соединений, выполняемых запрессовкой. Данные уровни установлены для градации необходимого минимального усилия демонтажа запрессовываемого контакта при различных условиях практических напряжений.

Библиографический список

1. **IEC 6 0352-5**, S olderless C onnections — Pa rt 5 : Press-in connections — G eneral requirements, test methods and practical guidance, Edition 3.0, 2008-01.
2. **Reliability** of PressFIT Connections / Stolze T. Et all // I nfineon T echnologies A G, w ww.bodospower.com, june. 2008.
3. **Плотников Ф.Г.** Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой, — новый класс соединений на российском рынке электронной техники // Компоненты и технологии. 2001. № 1.
4. **Медведев А.М.** Сборка и монтаж электронных узлов. М.: Техносфера, 2007.

sb815.indd 20 27.07.2015 15:01:11

УДК 62-192: 658.5.012.1

А.В. Широкий, *канд. техн. наук (Волгоградский проектный филиал АО "Атомэнергопроект"),*
М.Г. Кристаль, *д-р техн. наук (Волгоградский государственный технический университет)*
E-mail: shiroky_alex@mail.ru

Статистическое моделирование надежности различных структур технологических систем

Представлены рез ультаты и митационного моделирования работы системы в целях установления в лияния час тных к оэффициентов готов - ности единиц оборудования, входящих в систему, на итоговый к оэффициент ее готовнос ти п ри последовательном с оединении единиц те хнологического оборудования без устройств межоперационного накопления , пара ллельном с оединении единиц технологического оборудования с возможностью одновременной работы, параллельном соединении по схеме с резервированием. Для каждой структуры пол учены эк спериментальные за висимости и п одтверждены а налитические в ыражения, связыв ающие в еличины к оэффициентов готовности входящих в нее единиц технологического о борудования и о бщего к оэффициента готовности структуры в целом. Приведены условия применимости зависимостей.

It was p resented the r esults o f the s imulation wo rk the processing system in order to es tablish the i nfluence of the par ticular c oefficients of equ ipment's a vailability ratio on the r esulting availability ratio in a s eries connection units of t echnological equipment without de vices interoperable ac cumulation, a par allel c onnection o f u nits of technological equipment with the possibility of simultaneous oper ation, the par allel c onnection wi th r edundant equipment. For each structure experimental relationships were obtained and analy tic e xpressions for c onnecting the coefficients of availability ratio of technological equipment's units and general availability of the structure were confirmed. It was given the conditions of applicability.

Ключевые слова: технологическая система, предмет производства, интенсивность потока, степень последействия, надежность функционирования

Keywords: production system, machined parts, rate of occurrence, degree of aftereffect, operational reliability.

Введение

Выполненные ранее авторами теоретические исследования [1] влияния структуры блоков (БЛ$_i$) технологической системы (ТС) на надежность ее функционирования, определяемую в соответствии с [2] коэффициентом готовности оборудования $K_{\text{г}}^{\text{ТС}}$, и производительность $\lambda^{\text{ТС}}$ позволили установить характер такого влияния.

Полученные результаты нуждаются в экспериментальной проверке, которая может быть проведена методами статистического моделирования с учетом выдвинутых в [1] гипотез и результатов более ранних исследований авторов [3—7].

По аналогии с [1] рассмотрены следующие модели функционирования:

- технологический блок БЛ$_i$, состоящий из k последовательно соединенных единиц оборудования без устройств межоперационного накопления предметов производства (ПП);
- БЛ$_i$, состоящий из k единиц идентичного оборудования, соединенных и работающих параллельно;
- БЛ$_i$, состоящий из двух идентичных единиц — основной ЕТО^{осн} и резервной ЕТО^{рез}.

Технологический блок БЛ$_i$, состоящий из *k* последовательно соединенных единиц оборудования без устройств межоперационного накопления ПП

Для проверки гипотезы о накоплении потерь производительности в таком БЛ$_i$, приводящих к снижению коэффициента готовности $K_{\text{г}_i}$, авторами было выполнено статистическое моделирование его работы в среде пакета Mathcad 13 Rus (документ № Тч 005377 от 19.06.2006).

Рассмотрена обработка 20 000 деталей в БЛ$_i$, состоящим из последовательно соединенных ЕТО$_{ij}$, $j \in [2, ..., 11]$, при различных сочетаниях параметров ЕТО$_{ij}$. Для проверки адекватности выражения

$$K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = \left(1 + \sum_{j=1}^{k} T_{\text{в}_{ij}} / T_{\text{р}_{ij}}\right)^{-1} \quad (1)$$

sb815.indd 21 27.07.2015 15:01:11

величины $T_{р_{ij}}$ и $T_{в_{ij}}$ варьировались таким образом, чтобы коэффициент готовности $K_{г_{ij}}$ каждой j-й ЕТО$_{ij}$ принадлежал интервалу [0,4; 1,0] с одновременным выполнением неравенств

$$T_{р_{i1}} \neq T_{р_{i2}} \neq T_{р_{ij}} \neq T_{р_{ik}}; \quad T_{в_{i1}} \neq T_{в_{i2}} \neq T_{в_{ij}} \neq T_{в_{ik}}. \quad (2)$$

Для проверки применимости выражения (1)

$$K_{г_i}^{БЛ} = \left(1 + k\, T_{в_{ij}} / T_{р_{ij}}\right)^{-1}, \quad (3)$$

неравенства (2) были заменены на соответствующие равенства.

Отдельно смоделированы случаи, когда $T_{р_{ij}}$ и $T_{в_{ij}}$ являются постоянными величинами, и случай, когда они являются случайными величинами в соответствии с результатами, приведенными в [1—7]. При этом величина $T_{р_{ij}}$ подчиняется гамма-распределению с интенсивностью $\lambda_{р_{ij}}$ и коэффициентом $k_{р_{ij}}$ степени последействия потока интервалов безотказной работы ЕТО$_{ij}$, а случайная величина времени $T_{в_{ij}}$ восстановления оборудования подчинена гамма-распределению с интенсивностью $\lambda_{в_{ij}}$ и коэффициентом $k_{в_{ij}}$ степени последействия потока интервалов восстановления оборудования.

На рис. 1 приведены результаты расчетов $K_{г_i}^{БЛ}$ по выражению (3) и смоделированные данные (обозначены точками) для пяти экспериментов при значениях $K_{г_{ij}}$, равных 0,75; 0,86; 0,92; 0,96; 0,98.

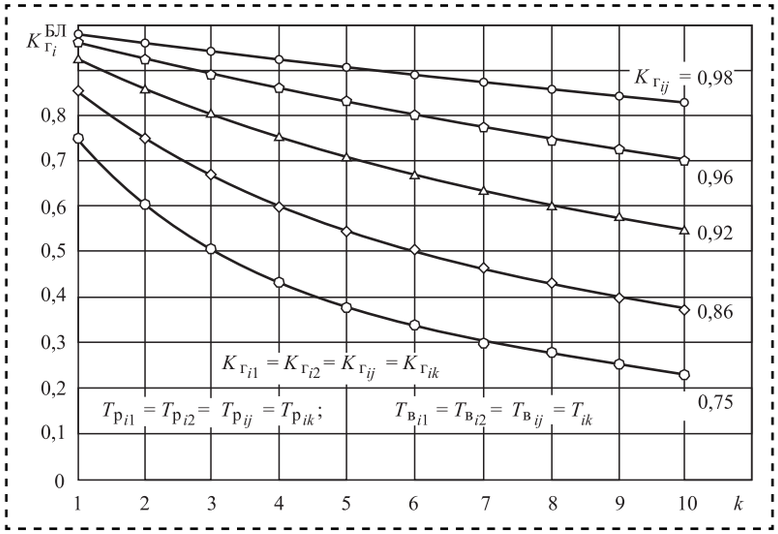

Рис. 1. Влияние числа *k* последовательно соединенных идентичных ЕТО на общий коэффициент $K_{г_i}^{БЛ}$ готовности блока

Моделированием установлено, что в цепочке из k последовательно соединенных ЕТО$_{ij}$ без устройств межоперационного накопления деталей имеет место единая производительность $\lambda_{вых_i}$ (см. рис. 2 из [1]).

БЛ$_i$, состоящий из *k* единиц идентичного оборудования, соединенных и работающих параллельно

Для подтверждения гипотезы о взаимной компенсации простоев в БЛ$_i$, состоящем из k параллельно соединенных и работающих одновременно ЕТО$_{ij}$, что обусловливает повышение величины коэффициента $K_{г_i}^{БЛ}$ готовности всего блока в целом по сравнению с частными значениями коэффициента $K_{г_{ij}}$ ЕТО$_{ij}$, статистически смоделирована обработка 20 000 деталей.

В ходе эксперимента величины $T_{р_{ij}}$ и $T_{в_{ij}}$ варьировались так, чтобы коэффициент $K_{г_{ij}}$ готовности каждой j-й ЕТО$_{ij}$ принадлежал интервалу [0,1; 1,0] и аналогично предыдущему случаю одновременно выполнялись неравенства (2).

Экспериментально установлено влияние коэффициентов $K_{г_{ij}}$ на величину коэффициента $K_{г_i}^{БЛ}$ готовности для двух случаев:

интервалы обработки ПП в каждой ЕТО$_{ij}$ являются случайными величинами, имеющими гамма-распределение с параметрами λ_{ij} и k_{ij} [3—7] (рис. 2, *а*);

интервалы обработки ПП в каждой ЕТО$_{ij}$ являются постоянными величинами, обратно пропорциональными средней величине ее производительности λ_{ij} (рис. 2, *б*).

Результаты моделирования, представленные на рис. 2 экспериментальными точками, приведены для БЛ$_i$, состоящего из двух параллельно соединенных однородных и одновременно работающих ЕТО.

Из анализа формы функций $K_{г_i}^{БЛ} = f\left(K_{г_{i1}}, K_{г_{i2}}\right)$ (см. рис. 2) следует, что вариативность или постоянство величин интервалов времени обработки ПП в каждой ЕТО$_{ij}$ не оказывает существенного влияния на значение коэффициента $K_{г_i}^{БЛ}$ готовности. Поэтому в дальнейшем для обобщенного

sb815.indd 22 27.07.2015 15:01:11

представления материалов моделирования рассмотрены случаи, когда интервалы обработки ПП в $ЕТО_{ij}$ являются случайными величинами, имеющими гамма-распределение с параметрами λ_{ij} и k_{ij}.

Вид функциональной зависимости $K_{Г_i}^{БЛ} = f\left(K_{Г_{i1}}, K_{Г_{i2}}\right)$ (см. рис. 2) определяется соотношением величины интенсивности $\lambda_{вх_i}$ входящего в $БЛ_i$ потока ПП и суммарной

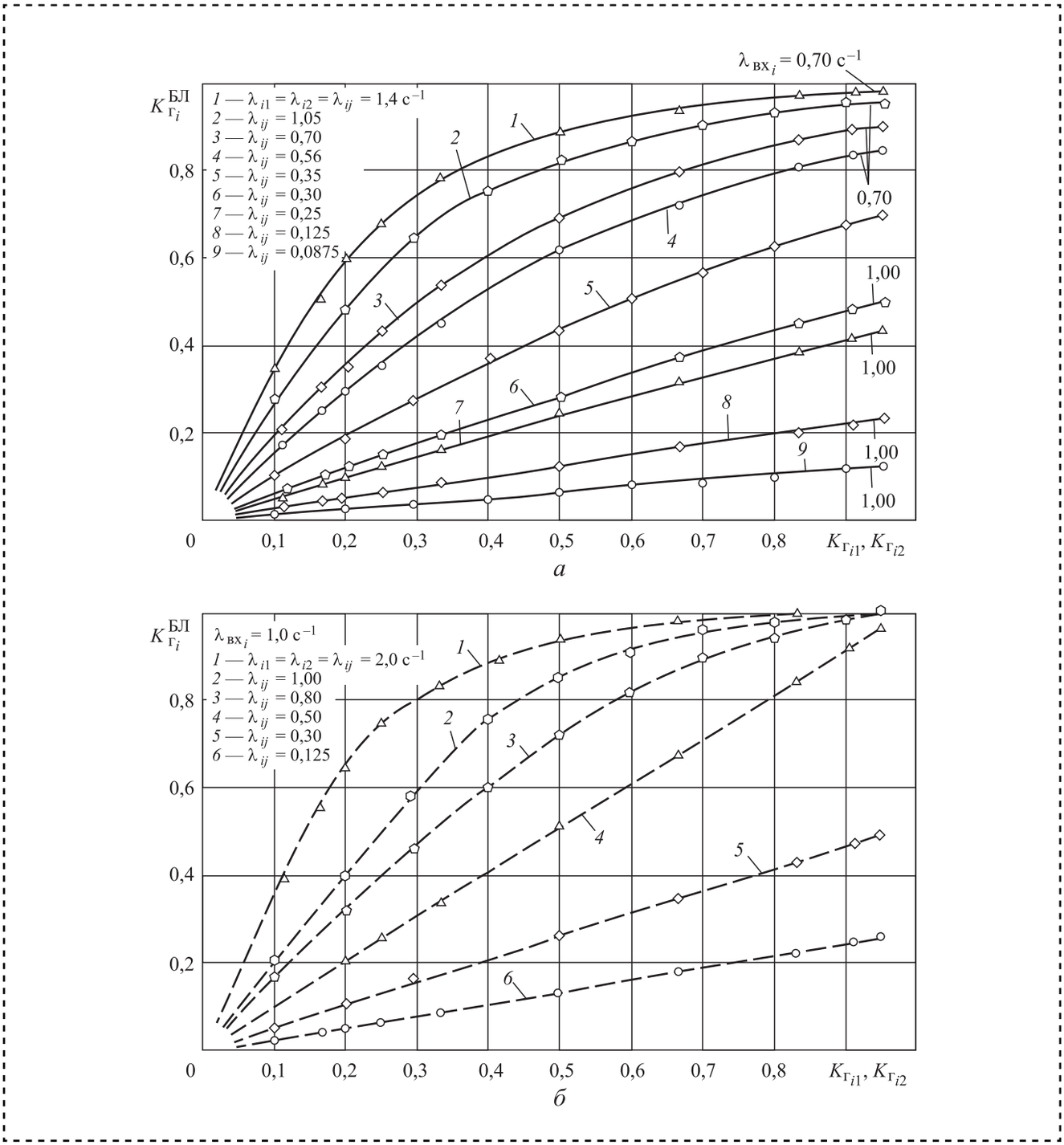

Рис. 2. Влияние коэффициентов $K_{Г_{i1}} = K_{Г_{i2}}$ готовности двух параллельно соединенных $ЕТО_{i1}$ и $ЕТО_{i2}$ на общий коэффициент $K_{Г_i}^{БЛ}$ готовности блока при $\lambda_{вх_i}$ = 0,7 и 1,0 с$^{-1}$ (*а*) и $\lambda_{вх_i}$ = 1 с$^{-1}$ (*б*)

sb815.indd 23 27.07.2015 15:01:12

величины интенсивности обработки, равной

$$\lambda_{\text{вых}_i} = \sum_{j=1}^{2} K_{\text{г}_{ij}} \lambda_{ij}.$$

Когда $\lambda_{\text{вых}_i} \leqslant \lambda_{\text{вх}_i}$ (экспериментальные кривые *6—9* на рис. 2, *а* или *4—6* на рис. 2, *б*), повышение коэффициента готовности каждой ЕТО$_{ij}$ приводит к пропорциональному повышению коэффициента $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}}$, что позволяет говорить о линейном виде функциональной зависимости $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = f\left(K_{\text{г}_{i1}}, K_{\text{г}_{i2}}\right)$. Когда $\lambda_{\text{вых}_i} > \lambda_{\text{вх}_i}$, повышение коэффициента готовности каждой ЕТО$_{ij}$ не приводит к пропорциональному повышению коэффициента $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}}$ (экспериментальные кривые *1—5* на рис. 2, *а* или *1—3* на рис. 2, *б*), что говорит о нелинейном характере функциональной зависимости $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = f\left(K_{\text{г}_{i1}}, K_{\text{г}_{i2}}\right)$. Полученные при моделировании работы рассматриваемого БЛ$_i$ данные могут быть описаны следующими выражениями:

$$K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{\text{вх}_i}} \sum_{j=1}^{2} K_{\text{г}_{ij}} \lambda_{ij}\right) \text{ при } \lambda_{\text{вых}_i} < \lambda_{\text{вх}_i};$$

$$K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = 1{,}05\left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{\text{вх}_i}} \sum_{j=1}^{2} K_{\text{г}_{ij}} \lambda_{ij}\right)\right] \text{при } \lambda_{\text{вых}_i} = \lambda_{\text{вх}_i};$$

$$K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = \frac{1}{\lambda_{\text{вх}_i}} \sum_{j=1}^{2} K_{\text{г}_{ij}} \lambda_{ij} \text{ при } \lambda_{\text{вых}_i} > \lambda_{\text{вх}_i}.$$

Полученные выражения без потери общности распространены на случай БЛ$_i$, состоящего из k параллельных ЕТО$_{ij}$:

$$K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = 1 - \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{\text{вх}_i}} \sum_{j=1}^{k} K_{\text{г}_{ij}} \lambda_{ij}\right) \quad (4)$$

при $\lambda_{\text{вых}_i} < \lambda_{\text{вх}_i}$, $j = 1, 2, \ldots, k$;

$$K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = 1{,}05\left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{\text{вх}_i}} \sum_{j=1}^{k} K_{\text{г}_{ij}} \lambda_{ij}\right)\right] \quad (5)$$

при $\lambda_{\text{вых}_i} = \lambda_{\text{вх}_i}$, $j = 1, 2, \ldots, k$;

$$K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = \frac{1}{\lambda_{\text{вх}_i}} \sum_{j=1}^{2} K_{\text{г}_{ij}} \lambda_{ij} \quad (6)$$

при $\lambda_{\text{вых}_i} > \lambda_{\text{вх}_i}$, $j = 1, 2, \ldots, k$.

БЛ$_i$, включающий основную и резервную единицы оборудования

Экспериментально оценено сокращение потерь при резервировании ЕТО$_{ij}$ в технологическом блоке БЛ$_i$ за счет перекрытия времени восстановления вышедшей из строя основной ЕТО^{осн} временем функционирования резервной ЕТО^{рез} и повышения коэффициента $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}}$ готовности технологического блока. Рассмотрен процесс обработки 20 0 00 деталей при различных сочетаниях $K_{\text{г}_i}^{\text{осн}}$ основной ЕТО^{осн} и $K_{\text{г}_i}^{\text{рез}}$ резервной ЕТО^{рез}.

Результаты имитационного моделирования (рис. 3) показали достоверность теоретически полученного выражения для коэффициента $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}}$ [1]:

$$K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = K_{\text{г}_i}^{\text{осн}} + K_{\text{г}_i}^{\text{рез}}, \quad K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} \leqslant 1. \quad (7)$$

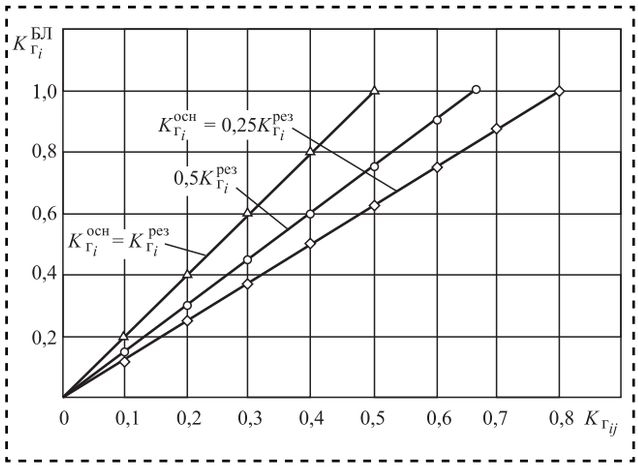

Рис. 3. Влияние коэффициентов готовности $K_{\text{г}_i}^{\text{осн}}$ основной ЕТО и $K_{\text{г}_i}^{\text{рез}}$ резервной ЕТО на коэффициент $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}}$ готовности блока с резервированием

Результаты моделирования (точки) и расчетные значения величины $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}}$ по выражению (7) показывают, что $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} \leqslant 1$ при любом сочетании коэффициентов готовности $K_{\text{г}_i}^{\text{осн}}$ и $K_{\text{г}_i}^{\text{рез}}$.

Заключение

Выполнено статистическое моделирование работы технологических блоков, имеющих в своем составе наиболее часто встречающи-

sb815.indd 24 27.07.2015 15:01:12

еся на практике типы структур (соединение ЕТО: последовательное, параллельное, с резервированием). Анализ результатов показал адекватность теоретической оценки влияния коэффициентов готовности единиц технологического оборудования, входящих в состав блока, на его общий коэффициент готовности.

Экспериментально установлен вид функциональной зависимости $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}} = f\left(K_{\text{г}_{i1}}, K_{\text{г}_{i2}}, \ldots, K_{\text{г}_{ik}}\right)$ и даны значения коэффициента $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}}$ готовности технологического блока при различных сочетаниях параметров ЕТО, входящих в него.

Установлено, что коэффициент готовности $K_{\text{г}_i}^{\text{БЛ}}$ технологического блока с резервированием является суммой частных коэффициентов готовности ЕТО, входящих в этот блок.

Библиографический список

1. **Широкий А.В., Кристаль М.Г.** Влияние структурной компоновки блоков технологической системы на производительность и надежность их функционирования // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2015. № 6. С. 10—15.
2. **ГОСТ 2 7.002—89**. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: ИПК "Издательство стандартов", 2002.
3. **Технология** автоматической сборки / А.Г. Холодкова и др.; под ред. А.Г. Холодковой. М.: Машиностроение, 2010. 560 с.
4. **Кристаль М.Г., Широкий А.В.** Имитационное моделирование потоков ПП в каналах питания технологического оборудования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2 004. № 1 1. С. 22—26.
5. **Кристаль М.Г., Широкий А.В., Чувилин И.А.** Новый подход в определении объема накопителя деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 12. С. 6—9.
6. **Бабушкин М.Н., Кристаль М.Г.** Перспективы повышения производительности автоматических сборочных систем (АСС) // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 8. С. 22—29.
7. **Кристаль М.Г.** Производительность и надежность сборочных автоматов. Волгоград: Изд. ВолгГТУ, 2011. 159 с.

МЕЖРЕГИОНАЛЬНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ "ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ"

Севастополь, 22—25 сентября 2015 г.

Конференция состоится 22—25 сентября 2015 г. на базе Севастопольского государственного университета при поддержке Законодательного Собрания, Правительства Севастополя, Командования ЧФ РФ.

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ ВКЛЮЧАЕТ СЛЕДУЮЩИЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ

- Политика информатизации и стратегия развития информационного общества
- Информационная война и информационная безопасность
- Информационные технологии в ОПК и критических инфраструктурах
- Импортозамещение и технологическая безопасность ИТ-сферы
- Информационная среда и телекоммуникационная инфраструктура
- Безопасный интеллектуальный район-город-регион
- ИТ-специалисты и кадровый потенциал промышленных предприятий
- Теоретические проблемы информатизации
- ИТ-продукты и услуги
- Информатизация социальной сферы
- Подготовка и переподготовка ИТ-специалистов
- Образовательные и профессиональные стандарты в ИТ-сфере

Почтовый адрес Оргкомитета Конференции:
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33
Севастопольский государственный университет (СевГУ).
тел.: +7 (8692) 435-290, e-mail: pervukhina14@mail.ru; http://sguc.code-bit.com/

sb815.indd 25 27.07.2015 15:01:13

УДК 621.039.533

А.В. Тимофеев, С.А. Душев, *канд. техн. наук,*
А.В. Ермаков, С.В. Голубев, А.Ю. Иваков, Л.И. Жилкин *(АО "ОКБМ Африкантов")*
E-mail: ermakov@okbm.nnov.ru

Особенности конструкции и технологии изготовления механизма наведения, применяемого при извлечении ОТВС активной зоны реактора

Рассмотрены конструкция и технология изготовления механизма наведения, предназначенного для выгрузки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) активной зоны ядерного реактора. Описаны основные технологические решения, примененные в проце ссе изготов ления кр упногабаритных деталей и сборок высокой точности.

Considered is a d esign and fab rication p rocess o f the guidance mechanism designed to unload spent fuel assemblies (SFA) f rom th e nu clear r eactor c ore. D escribed ar e bas ic s olutions fo r the fab rication p rocess that are used in the course of manufacturing large-size high-precision parts and assemblies.

Ключевые слова: механизм наведения, перегрузка, реактор, ОТВС.

Keywords: guidance mechanism, refueling, reactor, SFA.

Механизм наведения — это устройство, предназначенное для наведения оси направляющей трубы на требуемую координату активной зоны парогенерирующего блока (ПГБ), а также для обеспечения биологической защиты обслуживающего персонала при выполнении работ по выгрузке отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС).

При создании механизма наведения основной задачей было обеспечение линейного перемещения направляющей трубы (трубы для извлечения ОТВС) в пределах люков крышки реактора, при этом должна быть обеспечена надежная биологическая защита обслуживающего персонала.

Совмещение оси направляющей трубы с осью ОТВС в данной схеме достигается за счет обеспечения механизмом наведения (рис. 1) линейного перемещения трубы.

Механизм наведения состоит из механизма вращения *1*, каретки *2*, привода *3*, трубы направляющей *4* и воронки *5*.

Процесс наведения на нужную координату и подрыв ОТВС выполняется с пульта управления либо дистанционно со шкафа управления. Электроприводы имеют ручные дублеры.

Вызывает интерес не только конструкция механизма наведения, но и технология его изготовления, поскольку этот механизм представляет собой сборочную единицу высокой степени точности, состоящую из достаточно крупногабаритных деталей и узлов. Для механической обработки и сборки изделия и составляющих его элементов специалистами АО "ОКБМ Африкантов" были спроектированы и изготовлены более 100 наименований специальной оснастки.

Качество сборки готового изделия определяет механизм вращения. Он является наиболее трудоемким в изготовлении элементом механизма наведения.

Основные элементы механизма вращения — основание и плиты — были изготовлены из индивидуальных кованых заготовок. Механическая обработка этих деталей высокой точности (внутренние и наружные цилиндрические поверхности — до 7-го квалитета) выполнялась на современном оборудовании токарно-карусельной и расточной групп с применением высокопроизводительного режущего инструмента. Во избежание деформации поверхностей деталей из-за возможных внутренних напряжений в материале механическая обработка их была выполнена по заранее отработанной схеме:

черновая обработка всех поверхностей с минимально возможным припуском;

sb815.indd 26 27.07.2015 15:01:13

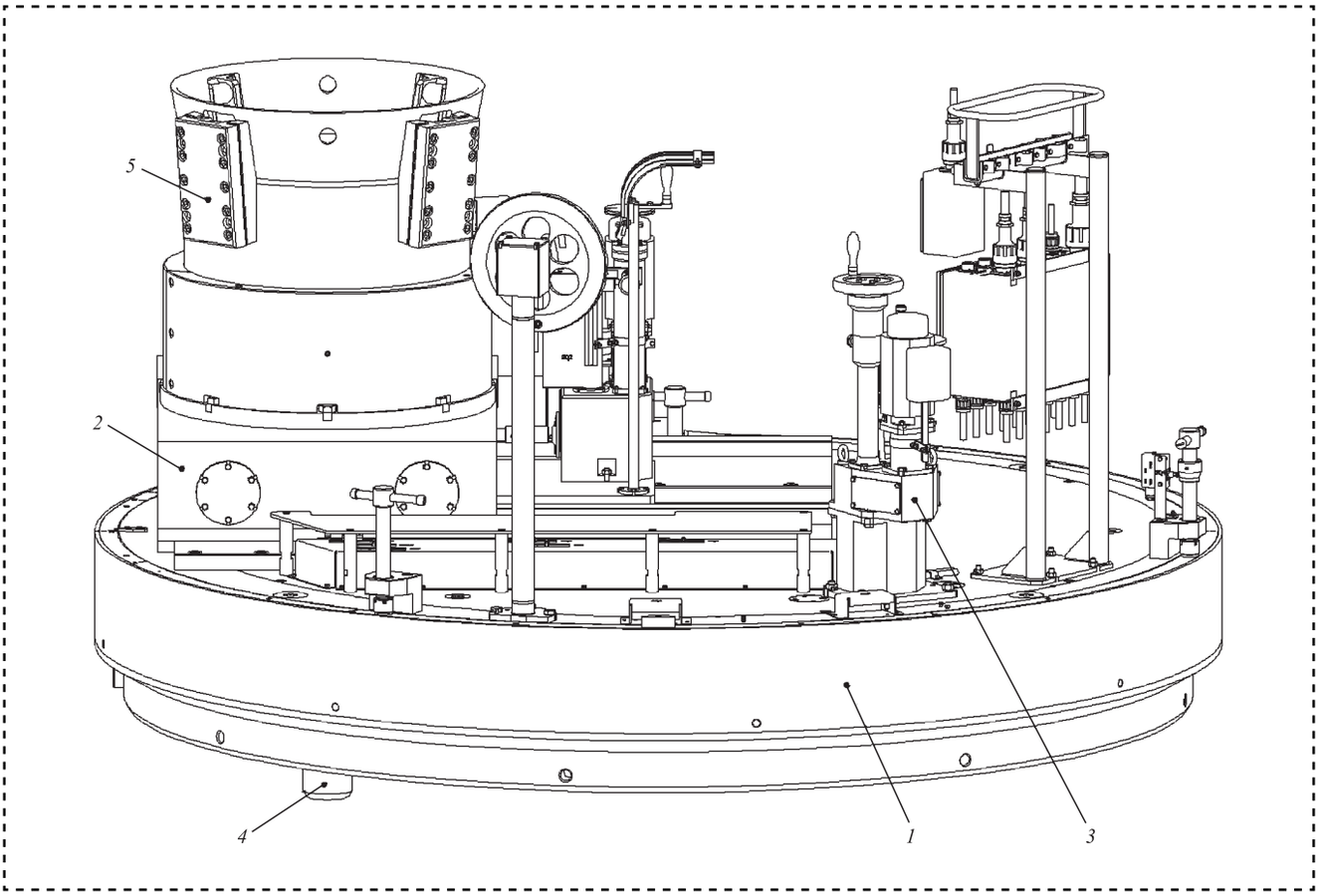

Рис. 1. Механизм наведения

чистовая обработка с обеспечением заданных размеров и допусков формы и расположения.

Обработка цилиндрических поверхностей, расположенных с эксцентриситетом друг относительно друга, была обеспечена за счет точного смещения кулачков токарно-карусельного станка относительно центра планшайбы с применением специального приспособления для выверки.

Для сборки, кантовки и строповки деталей и сборочных единиц, входящих в состав механизмов вращения и наведения, с учетом значительных габаритов и массы этих механизмов (масса механизма наведения более 20 т) были разработаны схемы кантовки и строповки, спроектированы и изготовлены необходимые грузоподъемные приспособления.

Для перемещения изделия и составляющих его элементов в процессе сборки применялась штатная траверса (рис. 2), входящая в состав комплекса. В целях предохранения изделий от повреждений на всех этапах изготовления кантовка плит из состава механизма вращения выполнялась с помощью специального технологического кантователя, упрощающего выполнение операции и обеспечивающего сохранность изделия.

Необходимые конструктивные зазоры в подшипниковых узлах и зубчатых зацеплениях механизма наведения и его узлов были обеспечены регулировочными прокладками. Этот метод регулировки редко применяется в условиях серийного производства, но при изготовлении единичных образцов продукции (как в данном случае) очень эффективен и экономически оправдан.

В целях обеспечения высокой точности сборки и из-за труднодоступности ряда поверхностей изделия потребовалось изготовить

sb815.indd 27 27.07.2015 15:01:13

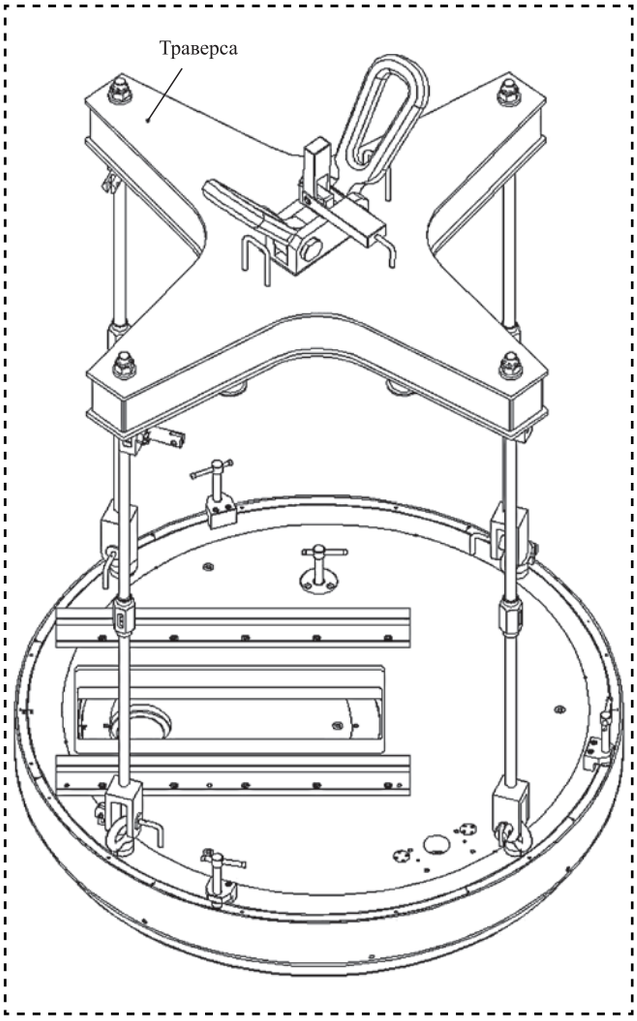

Рис. 2 . Строповка механизма вращения с помощью траверсы

комплект мерительной оснастки. Значительная часть замеров была выполнена с применением высокоточных методов контроля, освоенных АО "ОКБМ Африкантов". Контроль взаимного расположения элементов при сборке осуществлялся с помощью переносной контрольно-измерительной машины.

Этап монтажа электрооборудования является не менее важным этапом, чем механическая обработка и сборка. Он также успешно был выполнен сотрудниками предприятия.

Для проверки работоспособности перегрузочного оборудования в целом и механизма перегрузки в частности на территории АО "ОКБМ Африкантов" был построен полноразмерный комплексный стенд. Первый этап межведомственных испытаний механизма наведения, проведенный на этом стенде, показал работоспособность выбранной конструкции. Применение оборудования по прямому назначению подтвердило этот результат.

Библиографический список

1. **Дементьев Б.А.** Ядерные энергетические реакторы. М.: Энергоатомиздат, 1990. 351 с.
2. **Винокуров В.А., Петровский В.И., Ратин О.И.** Перезарядка корабельных ядерных реакторов. СПб.: Изд. ВМИИ, 2003. 121 с.

sb815.indd 28 27.07.2015 15:01:13

УДК 621. 9

Ю.П. Бурочкин, *канд. техн. наук*
(Самарский государственный технический университет)
E-mail: konferencia-isap@yandex.ru

Устройства для крепления шлифовальных инструментов

Рассмотрены ос обенности и п редложены новые к онструкции у стройств д ля крепления различных ш лифовальных инстр ументов и и х комплектов, а т акже р абочих элементов, оснащенных абразивными, алмазными и эльборовыми зерновыми материалами.

The features and the proposed new design of devices for attaching various grinding tools and their accessories, as well as work items, equipped with abrasive, diamond and CBN grain materials.

Ключевые слова: устройства, оправки, шлифовальные круги, рабочие элементы, балансировка.

Keywords: device, mandrel, grinding wheels, work items, balancing.

В настоящее время существуют различные стандартные устройства для крепления шлифовальных инструментов в виде кругов и рабочих элементов, а также их наборов, которые не всегда рационально используются для конкретных условий обработки.

От правильной установки и надежного крепления шлифовальных инструментов во многом зависят их износостойкость, а также производительность и качество обработки деталей и изделий машин.

Подготовка шлифовальных инструментов для работы на различных шлифовальных станках является одним из важных этапов современной технологии производства. Сборные шлифовальные инструменты и их наборы должны тщательно балансироваться, устанавливаться и крепиться в устройствах, предназначенных для современных станков.

Для одновременной обработки торцов головок шатунов двигателей с одного установа разработано специальное устройство [1] для крепления комплекта шлифовальных кругов (рис. 1).

Это устройство содержит гильзу *3*, в средней части которой между внутренними кругами *8* установлено средство для их перемещения, состоящее из втулки *10* с разнонаправленной резьбой на наружной поверхности и резьбовых гаек *9*. Жестко-упругие тарельчатые пружины *7* расположены между наружным и внутренним кругами каждой пары. Резьбовые кольца *5* навернуты на резьбовые участи гильзы *3*, на которых установлены наружные круги *6*. Между корпусом *12* с ввернутыми в него направ-

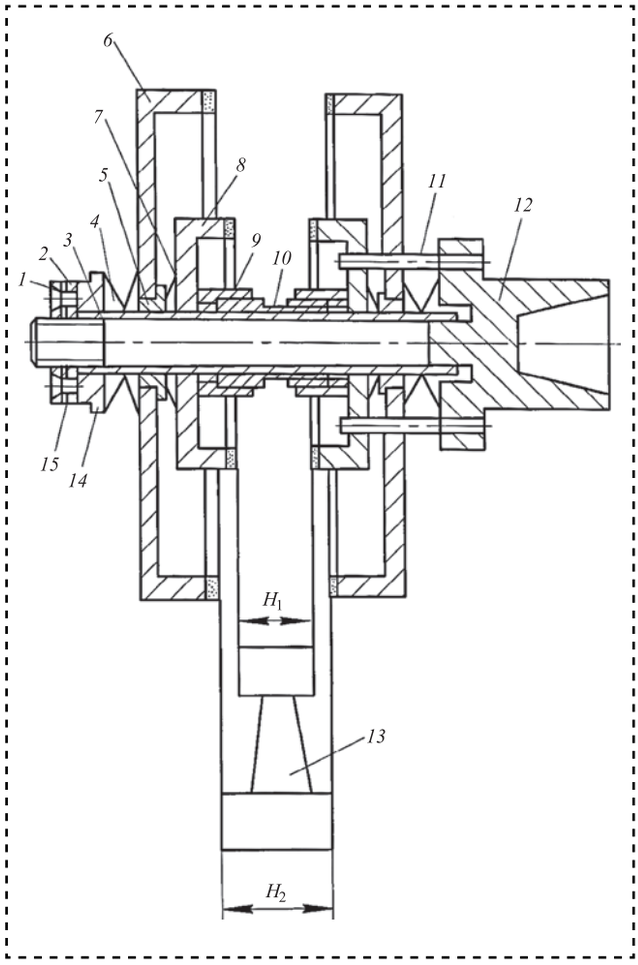

Рис. 1 . Схема устройства для крепления комплекта шлифовальных кругов

sb815.indd 29 27.07.2015 15:01:13

ляющими *11*, гайкой *14* и наружными кругами *6* установлены тарельчатые пружины *4*.

В сборе гильза *3* устанавливается на оправке с размещением направляющих *11* в отверстиях кругов *6* и *8*. Затем производят закрепление гильзы *3* гайкой *2* со стопорным винтом *1*.

Настройка устройства осуществляется следующим образом.

Устройство настраивают на размеры H_1 и H_2 обрабатываемых участков детали *13*. Перед работой настройка торцов кругов *8* на размер H_1 осуществляется в результате вращения втулки *10*, свободно установленной на гильзе *3*. При этом гайки *9* с разнонаправленными резьбами и одинаковым шагом будут перемещать круги *8* внутреннего комплекта относительно кругов *6* наружного комплекта.

Для предотвращения поворота кругов *8* относительно гильзы *3* служат направляющие *11*.

Независимое перемещение кругов *6* наружного комплекта осуществляется следующим образом. При вращении гильзы *3* с разнонаправленной резьбой на наружной поверхности резьбовые кольца *5* будут перемещать круги *6*, поджатые к ним тарельчатыми пружинами *4*, относительно кругов *8* внутреннего комплекта.

Предотвращение от поворота кругов *6* и *8* со стороны гайки *2* устраняется при их закреплении за счет больших сил трения между кругами и тарельчатыми пружинами *4*, *7* и гайками *9*, на торце которых выполнено рифление.

Устройство осуществляет независимую регулировку кругов одного комплекта относительно другого, снижает время на настройку, увеличивает диапазон обрабатываемых деталей, что позволяет расширить технологические возможности устройства.

В целях значительного сокращения расходов конструкционных сталей и алюминиевых сплавов, необходимых для производства корпусов стандартных абразивных, алмазных и эльборовых кругов, разработаны новые конструкции устройств (рис. 2).

На рис. 2, *а* представлено устройство [2] для крепления рабочих абразивоносных колец, используемых вместо торцовых плоских с выточкой формы 6А2 по ГОСТ 16170—91, чашечных и тарельчатых конических форм 12А2 соответственно по ГОСТ 16172—90 и ГОСТ 16175—90 кругов, работающих своими торцами.

Устройство содержит оправку *1*, на которой неподвижно расположен фланец *2*. В радиальных пазах фланца *2* установлен нажимной

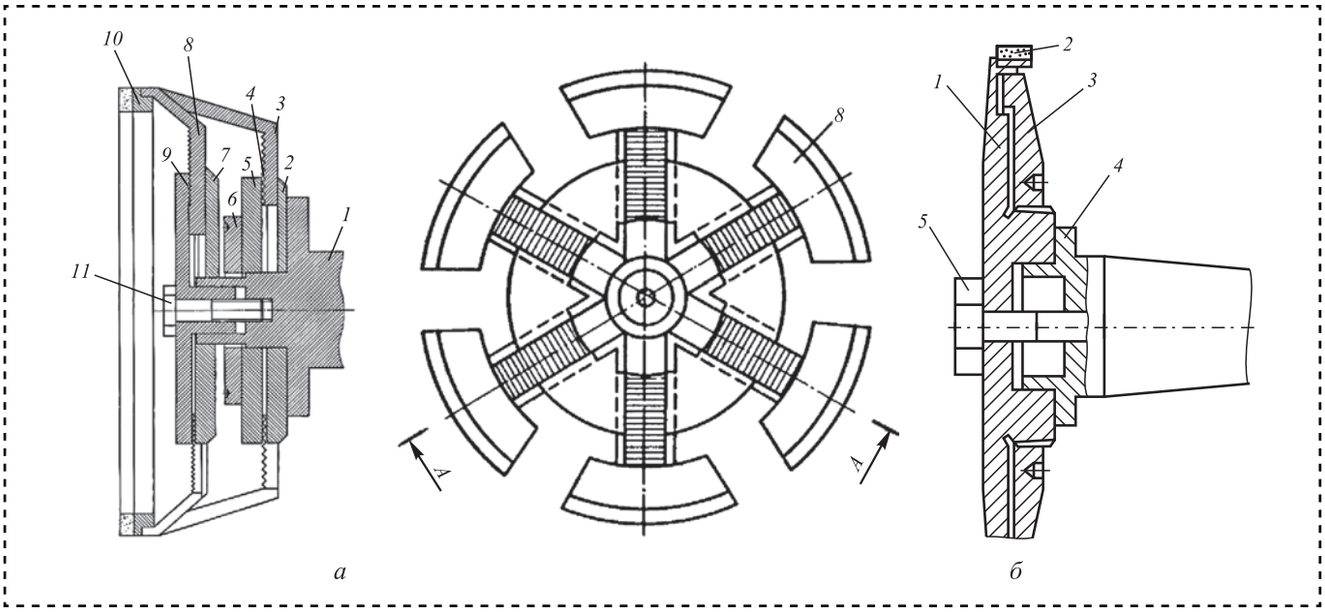

Рис. 2. Схема устройств для крепления рабочих абразивоносных элементов:
а — торцовых колец; *б* — периферийных колец

sb815.indd 30 27.07.2015 15:01:13

элемент, выполненный из отдельных опор *3* с коническими поверхностями, на основаниях которых выполнены рифления *4*. Опоры *3* закрепляются с помощью нижнего прижимного диска *5*, на торце которого выполнены выступы с ответными рифлениями и гайки *6*.

Устройство содержит также установленный на оправке *1* подвижный фланец *7* с радиальными пазами, в которых размещена цанга, выполненная в виде отдельных жестко-упругих прихватов *8*. На прихватах *8* выполнены прямые рифления, при этом прихваты *8* взаимодействуют с коническими поверхностями опор *3*. Закрепление прихватов *8* происходит при помощи верхнего прижимного диска *9*, на выступающих частях которого выполнены ответные рифления, а направляющая часть вставлена в отверстие оправки *1*.

Закрепление инструмента производят следующим образом.

Рабочий абразивоносный элемент *10* своей конической частью вставляют во внутреннюю часть жестко-упругих прихватов *8* с возможностью его базирования по торцу.

Вращением болта *11* фланцы закрепляют на оправке *1*, при этом давление головки болта передается на верхний прижимной диск *9*, который давит на основание прихватов *8*. Последние, скользя по коническим поверхностям опор *3*, упруго деформируются, надежно закрепляя рабочий абразивоносный элемент *10*.

Для замены рабочего абразивоносного элемента болт *11* выкручивают, снимают диск *9* и верхний подвижный фланец *7* с прихватами *8*. Гайкой *6* опускается прижимной диск *5*, и освободившиеся опоры *3* устанавливаются с помощью рифлений на больший (или меньший) размер элемента *10*. После этого гайкой *6* производят закрепление опор *3*. Затем устанавливают прихваты *8* на соответствующий размер по наружному посадочному диаметру рабочего абразивоносного элемента *10* и производят его закрепление.

Разработана также специальная оправка для закрепления рабочих абразивоносных колец, используемых вместо плоских прямого профиля формы 1А1 по ГОСТ 16167—90, с полукругло-выпуклым профилем формы 1FF1 по ГОСТ 16180—91, с двусторонним коническим профилем форм 1ЕЕ1 и 14ЕЕ1 кругов, работающих своей периферией.

На рис. 2 , *б* представлена конструкция оправки, которая содержит фланец *1*, на посадочной поверхности которого устанавливают рабочее абразивоносное кольцо *2*, крепежный диск *3*, корпус *4* и болт *5*. Фланец *1* имеет радиальные прорезы, выполняющие роль цанги.

Оправка работает следующим образом. Оправка своим корпусом *4* устанавливается в шпинделе шлифовального или заточного станка. Рабочее абразивоносное кольцо *2* надевается на посадочный диаметр фланца *1* до упора в ее буртик и закрепляется крепежным диском *3*. Собранный инструмент базируется на корпусе *4* и крепится посредством болта *5*.

Фланец и крепежный диск могут быть выполнены для рабочих абразивоносных колец вместо использования указанных выше форм кругов наиболее часто применяемых диаметров 125 и 150 мм. Радиальное биение кольца, установленного на оправке, не должно превышать 0,05 мм.

Для одновременной двусторонней обработки деталей с использованием многоместного приспособления на шлифовальных и заточных станках разработано устройство, конструкция которого представлена на рис. 3.

Предлагаемое устройство целесообразно использовать при заточке задних поверхностей сменных многогранных пластин (СМП) квадратной или ромбической формы с углом при вершине 80°. Устройство содержит оправку *1*, алмазные круги 2 и *5* формы 12А2 с углом 20° по ГОСТ 16175—90, компенсаторные эластичные элементы *3*, установочные шайбы *4* и крепежную гайку *6*.

Настройка устройства осуществляется следующим образом. Первоначально размер между рабочими торцами кругов устанавливают на больший (A + 2...3 мм) размер, чем размер A обрабатываемой детали, посредством набора размерных шайб. Затем при закручивании гайки *6*, создавая упругий натяг за счет эластичных прокладок *3*, производят настройку на требуемый размер A.

sb815.indd 31 27.07.2015 15:01:13

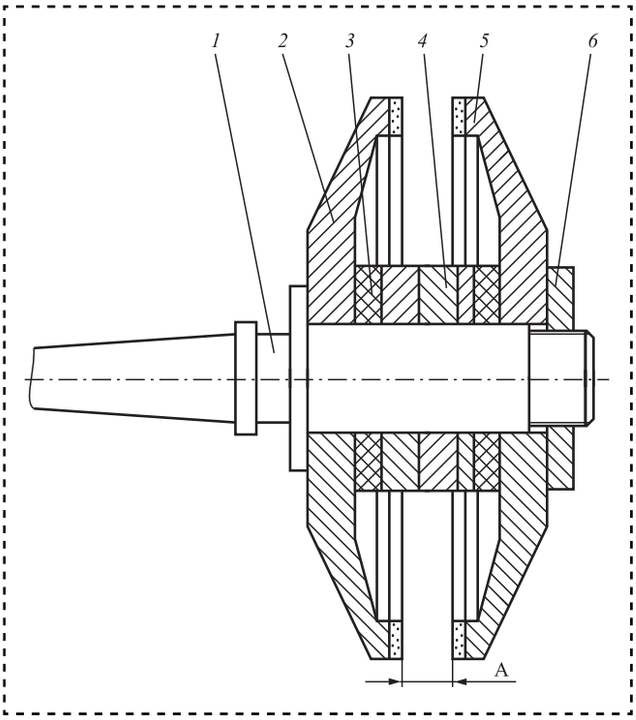

Рис. 3. Схема устройства для крепления и регулирования торцов кругов

В процессе работы устройства происходит износ рабочих торцов кругов. Для компенсации их износа производят перемещение круга *5* при закреплении гайки *6*. Контроль размеров между торцами кругов осуществляют блоком концевых мер.

Предлагаемое устройство позволяет повысить производительность и точность обработки деталей и восстановления сменных многогранных режущих пластин из твердосплавов.

Для повышения производительности и точности обработки П-образных пазов и выступов с различными параметрами по их ширине и расширения технологических возможностей разработано устройство [3] для крепления шлифовальных кругов (рис. 4).

Устройство содержит оправку *1*, выполненную в виде втулки, на которой между упругими элементами *2* и сменными компенсаторными кольцами *3* установлены шлифовальные круги *4*. Упругие элементы *2* выполнены в виде резиновых колец.

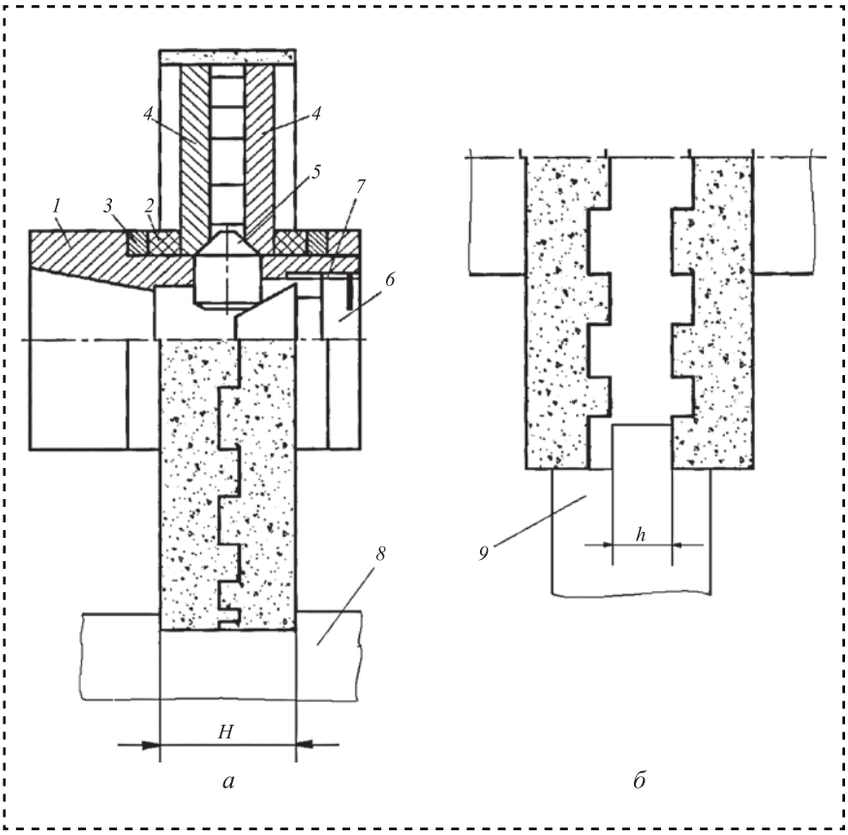

Рис. 4. Схема устройства для крепления шлифовальных кругов:
а — вариант для обработки пазов; *б* — вариант для обработки буртиков

Шлифовальные круги *4* взаимосвязаны посредством четырех толкателей *5*, выполненных в виде цилиндрических стержней, на обоих концах которых выполнены конические поверхности. Толкатели *5* соответствующими коническими поверхностями взаимодействуют с регулировочным коническим плунжером *6*, а другими — с шлифовальными кругами *4*. Перемещение плунжера *6* осуществляется при помощи резьбового соединения *7*.

Устройство работает следующим образом. Перед работой устройство (рис. 4, *а*) предварительно настраивают на размер паза заготовки *10* посредством сменных компенсаторных колец *3* и производят балансировку. Затем его устанавливают на валу шпинделя станка и закрепляют.

sb815.indd 32 27.07.2015 15:01:14

В процессе обработки боковых поверхностей пазов заготовок происходит износ абразивного слоя, приводящий к уменьшению размера между торцами кругов. Это явление вызывает необходимость настройки рабочих торцов кругов для сохранения точности обработки пазов в заготовках.

При перемещении с помощью плунжера *6* толкателей *5* в радиальном направлении происходит деформация упругих колец, одновременное перемещение шлифовальных кругов относительно их оси симметрии и, следовательно, тонкая регулировка на размер рабочей высоты инструмента.

Устройство при разводе кругов позволяет образовывать на торцах прерывистые поверхности (рис. 4, *б*) и производить двустороннее шлифование выступов.

Важной задачей повышения эффективности алмазного шлифования является снижение износа рабочего слоя кругов. Известно, что при работе кругами на металлических связках при обычном шлифовании износ алмазов больше, чем при прерывистом.

Метод прерывистого алмазного шлифования все чаще применяется в машиностроении, поскольку при этом обеспечивается снижение сил и температур резания, а следовательно, уменьшение износа алмазов. Предлагаемое устройство снижает трудоемкость изготовления различных пазов или выступов деталей.

Обработку сравнительно больших плоскостей деталей из твердых и жаропрочных сплавов целесообразно вести методом электроалмазного торцового шлифования кругами формы 12А2 или 6А2. Однако такой процесс шлифования связан с некоторыми трудностями (в частности, с удалением шлама, подводом и сменой электролита в межэлектродной зоне и др.).

Для улучшения подачи электролита в межэлектродную зону резания применяют торцовые круги с канавками на их рабочих поверхностях. Использование таких кругов сокращает их рабочую площадь и требуются дополнительные трудозатраты на изготовление.

В целях устранения перечисленных выше недостатков разработано устройство [4] для крепления шлифовального инструмента (рис. 5).

Устройство содержит оправку *1* со сквозным пазом *2*, на которой установлены наружный *3* и внутренний *4* круги. Между кругами расположен узел фиксации внутреннего круга, выполненный в виде диска *5* и Г-образных упоров *6*, служащих для базирования внутреннего круга *4* относительно наружного круга *3*. После установки упоров *6* на необходимый размер они закрепляются посредством гаек *7* винтами *8*.

Установка внутреннего круга *4* относительно наружного круга *3* на величину эксцентриситета $l = 0$ ...10 мм производится при перемещении первого вдоль буртиков *9* упоров *6* в радиальном направлении с последующим закреплением через шайбу *10* гайкой *11*. Для перемещения упоров *6* служат пазы *12*, выполненные на торце диска *5*.

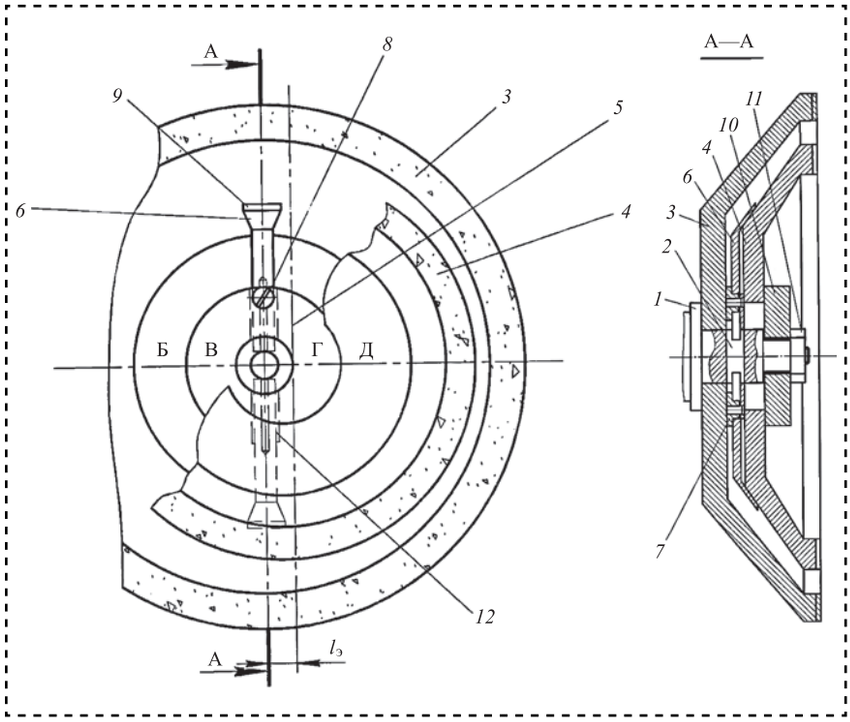

Рис. 5. Схема устройства для крепления шлифовального инструмента

sb815.indd 33 27.07.2015 15:01:14

Для устранения дополнительных биений кругов и, следовательно, нерационального их износа при многоразовой сборке шлифовального инструмента на их внутренних торцах нанесены установочные риски Б и Д, а на торце диска *5* — риски В и Г.

Сборка круга осуществляется следующим образом. На оправку *1* надевается круг *3*, внутри которого устанавливают диск *5* и совмещают его риску В с риской Б на круге *3*. Затем на буртики *9* упоров *6* размещают внутренний круг *4* и совмещают его риску Д с риской Г на диске *5*. После сборки шлифовального инструмента производят его балансировку и установку на шпинделе станка.

Использование узла фиксации внутреннего круга в предлагаемом шлифовальном инструменте позволяет сократить трудоемкость сборки инструмента и снизить потери времени на подготовку внутреннего круга к установке.

Данная конструкция шлифовального инструмента обеспечивает повышение производительности и снижение стоимости обработки и расхода алмазов на 30...40 %.

Для осуществления высокоэффективного электрохимического шлифования деталей из труднообрабатываемых сталей и сплавов разработано устройство для крепления алмазного круга, конструкция которого приведена на рис. 6.

Устройство состоит из корпуса *1* с внутренним и наружным коническими посадочными поверхностями шлифовального круга *2*, эластичного конического кольца *3*, специальной шайбы *5*, гайки *4*, тарельчатой пружины *6* и гайки *7*.

Шлифовальный круг *2* устанавливается на эластичном коническом кольце *3* корпуса *1* между тарельчатой пружиной *6* и шайбой *5*. Торец шайбы выполнен конической формы с возможностью радиального демпфирования одной кромки круга, снимающей основной припуск, при прямом ходе стола и осевого одностороннего упругого перемещения.

Шлифовальному кругу придают главное движение резания D_r. Процесс ведется при наложении на заготовку постоянного тока

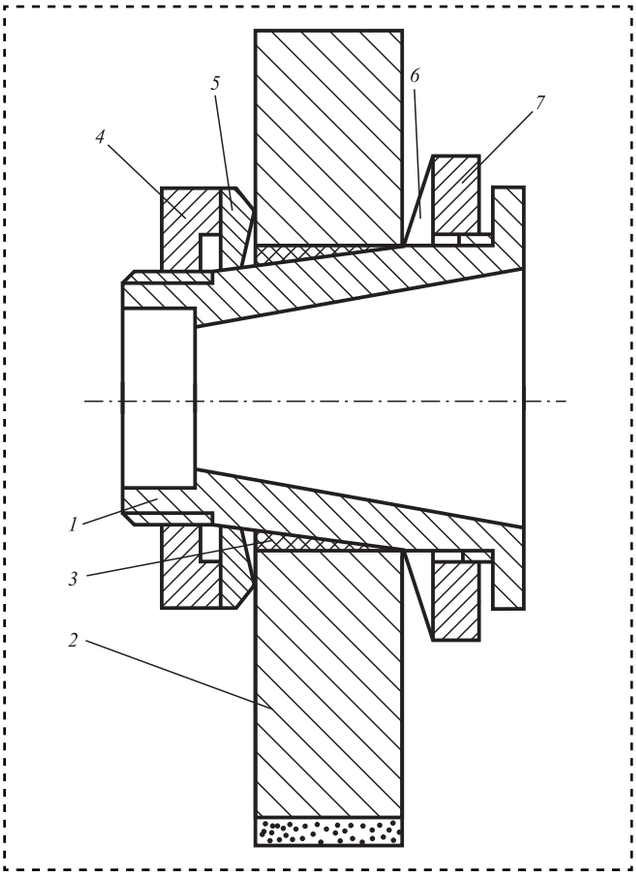

Рис. 6. Схема устройства для крепления шлифовального круга

прямой полярности под напряжением 6...8 В. В зону резания подается водный раствор солей. Глубина шлифования задается за один двойной продольный ход стола станка.

При прямом ходе $D_{s\ \text{пр}}$ основной припуск металла снимается упругим способом шлифования, снижающим эрозионные процессы. При этом обеспечиваются повышение стойкости круга и улучшение качества поверхности детали.

При обратном продольном ходе стола $D_{s\ \text{обр}}$ снимают оставшийся припуск жестким методом шлифования, обеспечивая повышение точности изготовления деталей.

Предлагаемое устройство позволяет повысить производительность и точность изготовления деталей из труднообрабатываемых материалов.

Для осуществления высокоэффективной электроалмазной разрезки заготовок в виде

sb815.indd 34 27.07.2015 15:01:14

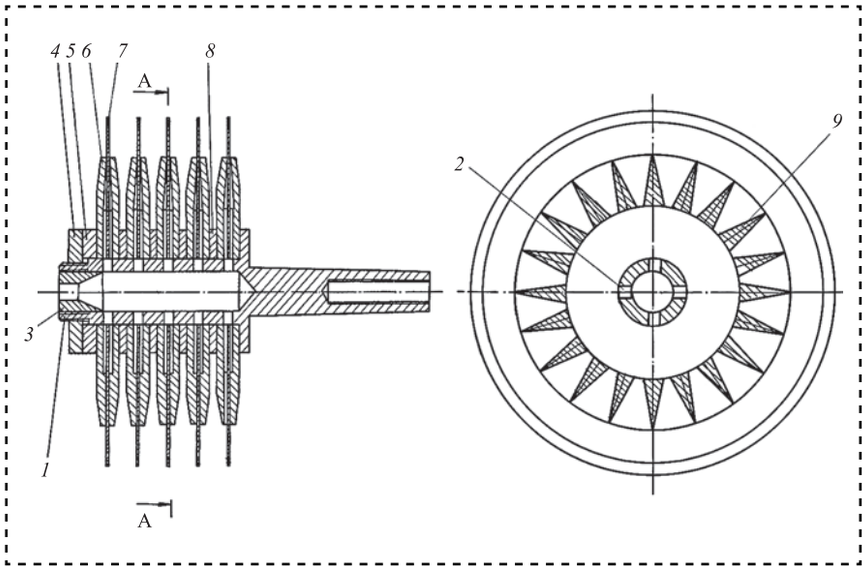

Рис. 7. Схема устройства для крепления набора отрезных кругов

квадратных пластин размером 70×70 мм и высотой 8...10 мм из синтетического твердосплавного инструментального материала (СТИМ-5), полученных методом СВС, разработано многокруговое устройство для крепления набора отрезных алмазных кругов формы 1А1R со сплошным алмазоносным слоем толщиной 0,8...1,0 мм по ГОСТ 10110—87 (рис. 7).

Устройство содержит полую оправку *1*, в которой выполнены радиальные сквозные отверстия *2* для подвода электролита к торцам установленных алмазных отрезных кругов *7*, втулку *3*, крепежную гайку *4*, шайбу *5*, опорные диски *6* и установочные шайбы *8*.

Для повышения жесткости отрезных алмазных кругов малых размеров по толщине в осевом направлении в устройстве применены дополнительные опорные диски.

Для достаточного и равномерного распределения в межэлектродном зазоре электролита на торцах опорных дисков *6* выполнены равномерно расположенные по окружности конические радиальные пазы *9*. Во втулке *3* находится отверстие с обратным конусом, на большем диаметре которого при высоких оборотах шпинделя возникают значительные центробежные силы, препятствующие выходу электролита из внутренней полости оправки *1*. На данном устройстве радиальное и торцевое биение устанавливаемых алмазных кругов не превышает соответственно 0,05 и 0,1 мм.

Все это позволяет существенно повысить производительность процесса разрезки заготовок, значительно снизить расход дорогостоящих алмазных отрезных кругов.

Библиографический список

1. **А.с. 1787752** СССР, МПК B24B 45/00. Устройство для крепления комплекта шлифовальных кругов / Ю.П. Бурочкин (СССР) — № 4827610/08; Заявл. 02.04.1990; Опубл. 15.01.1993; Бюл. № 2.
2. **А.с. 1691084** СССР, МПК B24B 45/00. Устройство для крепления абразивного инструмента / Ю.П. Бурочкин, М.Ю. Мухина (СССР) — № 4720191/08; Заявл.18.07.1989; Опубл. 15.11.1991; Бюл. № 42.
3. **А.с. 1558653** СССР, МПК B24B 45/00. Устройство для крепления шлифовальных кругов / Ю.П. Бурочкин, М.Ю. Мухина, Н.Н. Пилипцева (СССР) — № 4392115/31-08; Заявл. 15.03.1988; Опубл. 23.04.1990; Бюл. № 15.
4. **А.с. 1660948** СССР, МПК B24B 45/00. Шлифовальный инструмент / Ю.П. Бурочкин, М.Ю. Мухина (СССР) — № 4683410/08; Заявл. 2 5.04.1989; Опубл. 07.07.1991; Бюл. № 25.

sb815.indd 35 27.07.2015 15:01:14

УДК 621.9

А.А. Алексеев, Д.И. Волков, *д-р техн. наук*
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьева)
E-mail: alex-works@mail.ru

Безразборная диагностика состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования на основе анализа вибросигнала

Рассмотрены основные методы диагностики технического состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования без их демонтажа и разборки. Исследован способ оценки технического состояния подшипников по анализу вибросигнала. Определены достоинства и недостатки различных методов анализа спектра вибрационного сигнала.

The basic methods of diagnostics of technical condition of dynamically loaded assemblies and mechanisms of cutting equipment without disassembling and removal. Exploring ways to assess the technical condition of the bearing on the analysis of the vibration signal. Identified the advantages and disadvantages of various methods of analyzing the spectrum of the vibration signal.

Ключевые слова: диагностика технического состояния, вибродиагностика, спектр вибрационного сигнала.

Keywords: diagnostics of the technical condition, vibration diagnostics, spectrum of the vibratory signal.

Обеспечение работоспособности металлорежущего оборудования является важной задачей ремонтной службы предприятия. Для своевременного планирования ремонта и рационального использования средств на приобретение запасных частей и материалов требуется определение фактического состояния и остаточного ресурса узлов и механизмов металлорежущих станков.

Выбор оптимального метода и средств диагностирования технического состояния металлорежущего оборудования позволяет существенно снизить затраты на техническое обслуживание и ремонт.

Техническая диагностика — это установление и изучение признаков, характеризующих наличие дефектов в машинах, устройствах, узлах и т.п., для предсказания возможных отклонений в режимах их работы и для разработки методов и средств их обнаружения (http://www.slovopedia.com/2/210/267143.html).

Целью технического диагностирования изделий является поддержание установленного уровня надежности, обеспечение требований безопасности и эффективности использования изделий.

Техническое диагностирование изделий должно быть направлено на решение следующих взаимосвязанных задач [1]:

определение вида технического состояния;

поиск места отказа или неисправностей;

прогнозирование технического состояния.

Эффективное диагностирование позволяет получить объективную информацию о техническом состоянии каждой единицы оборудования, на основе которой можно обеспечить оптимальное техническое обслуживание и ремонт.

Анализ статистических данных по поломкам металлорежущего оборудования одного из предприятий за два года показал, что распределение неисправностей в процентном соотношении выглядит следующим образом:

43 % — неисправности гидро- и пневмосистем станка;

sb815.indd 36 27.07.2015 15:01:14

21 % — неисправность механической части станка;

18 % — неисправность системы управления и электропитания;

11 % — прочие незначительные неисправности;

7 % — неисправность систем принудительного охлаждения и кондиционирования.

Стабильная работа гидро- и пневмосистем станка является одним из важнейших факторов, влияющих на долговечность и безотказность работы всех узлов оборудования. Наличие достаточной смазки подвижных частей станка позволяет избежать преждевременного износа трущихся поверхностей и, следовательно, выхода из строя оборудования.

Течи жидкости и неисправность гидронасоса приводят к чрезмерному или недостаточному их расходу и пульсациям при работе механизмов. Несвоевременная замена фильтров влечет за собой загрязнение всей гидравлической системы, приводит к уменьшению протока и поломке оборудования.

Большую часть составили неисправности из первых трех групп. Для определения возможных причин возникновения поломок был проведен более детальный анализ этих групп. Результаты показали, что в основном неисправности возникали из-за несвоевременного или проведенного не в полном объеме технического обслуживания, а также вследствие отсутствия использования технической диагностики для определения фактического состояния объекта.

Проведение своевременного технического обслуживания является в большей степени проблемой организационного плана. В свою очередь, вопросы диагностики динамически нагруженных узлов и механизмов станка требуют детального изучения.

Существует множество методов и средств диагностирования технического состояния механической части станка. Применение всех методов в комплексе потребовало бы значительных финансовых затрат на приобретение технических средств и большого количества специалистов, обладающих знаниями в различных областях науки. В связи с этим требуется провести анализ основных методов технической диагностики применимо к динамически нагруженным узлам станка, содержащим, например, такие элементы, как подшипники, шарико-винтовые пары, шестерни.

Рассмотрим и проанализируем следующие основные методы диагностирования оборудования:

предварительная оценка технического состояния станка в результате слухового и зрительного восприятия оператором-станочником. В неисправных или имеющих повышенный износ узлах и механизмах станка появляются шумы, вибрации, по которым судят о наличии дефекта, и наблюдается повышение температуры;

тепловизионное диагностирование. Тепловизионная диагностика и тепловой контроль представляют собой высокотехнологичную область прикладных исследований, объединяющую достижения не только в создании аппаратуры (тепловизоров), но и в теории теплопередачи, информационных и компьютерных технологиях. Основными преимуществами тепловизионной диагностики являются возможность проведения тепловизионного контроля без специальных условий и без вывода объекта контроля из эксплуатации, безконтактность, контроль объектов любых форм и размеров, высокая производительность контроля, высокая скорость обработки результатов. Однако данные, получаемые по результатам тепловизионной диагностики металлорежущих станков, например температура на поверхности того или иного узла, не дают достаточной информации о фактическом состоянии его механизмов;

акустическое диагностирование. Применение технических стетоскопов, функционирующих в звуковом диапазоне частот, позволяет локализовать дефектный узел машины с повышенными стуками и шумами;

трибодиагностика. Она является методом диагностирования состояния трущихся деталей на основе анализа продуктов износа

sb815.indd 37 27.07.2015 15:01:14

в смазочном масле. При анализе проб масла определяют концентрацию в нем составляющего элемента изнашиваемого материала, по величине которой оценивают усредненный износ соответствующей детали. Недостатком данного метода является определение суммарного износа деталей, изготовленных из одних и тех же материалов;

метод поверхностной активации. Он основан на измерении интенсивности излучения радионуклидной метки, установленной на контролируемом участке поверхности объекта. В результате уноса радиоактивного вещества смазочным маслом в оборудовании или транспортируемой средой в трубопроводе это излучение уменьшается;

измерение геометрических параметров. Проверка основных геометрических параметров оборудования проводится в целях выявления отклонений от допустимых значений для дальнейшего определения причин данных отклонений. Для станков с ЧПУ применяются специальные современные технические средства проверки геометрических параметров: проверка согласованности работы приводов, контроль круговой траектории, определение люфтов по каждой координате, неперпендикулярности осей, непараллельности по каждой оси и др.;

вибрационное диагностирование. Метод основан на анализе вибрационного сигнала, получаемого в результате считывания вибрации с поверхности узла и преобразования полученного сигнала с помощью специальных технических средств. Считывание сигнала производится при помощи датчика-акселерометра с последующим сбором и расшифровкой в виброанализаторе. При этом любой дефект какого-либо узла характеризуется индивидуальной вибрационной картиной. Из множества параметров, характеризующих вибрационный процесс, выделяют только те, которые прямо или косвенно характеризуют состояние объекта. По этим параметрам формулируют информативную систему признаков, используемых при диагностировании. Метод позволяет определять различные параметры механического износа узлов и механизмов станка. Определяются дефекты подшипников, в том числе износ наружного и внутреннего колец, перекос кольца, износ тел качения, износ шестерен, перекос валов, износ шарико-винтовой пары и др.

Проанализировав рассмотренные выше методы диагностики, можно сделать вывод, что для определения состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования наиболее информативной и точной является вибрационная диагностика.

Вибрационная диагностика — метод диагностирования технических систем и оборудования, основанный на анализе параметров вибрации либо создаваемой работающим оборудованием, либо являющейся вторичной вибрацией, обусловленной структурой исследуемого объекта (http://ru.wikipedia.org/wiki).

Вибрационная диагностика, как и другие методы технической диагностики, решает задачи поиска неисправностей и оценки технического состояния исследуемого объекта.

Основными преимуществами вибрационной диагностики являются:

определение наличия скрытых дефектов;

как правило, не требуется разборка оборудования;

относительно небольшое время считывания необходимого спектра вибросигнала;

возможность обнаружения неисправностей на этапе их зарождения;

снижение ожидаемого риска возникновения аварийной ситуации при эксплуатации оборудования.

Вибрационные характеристики являются наиболее информативным инструментом для идентификации технического состояния узлов и механизмов оборудования. В процессе работы станка возникает широкий спектр колебаний, природа которых имеет как стационарный, так и нестационарный характер, могут действовать как вынужденные колебания, так и автоколебания. Автоколебания различаются при резании и при работе на холостых ходах, т.е. при его установочных перемещениях и при функционировании без резания. В процессе обработки динамические составляющие сил

sb815.indd 38 27.07.2015 15:01:14

резания в большинстве случаев имеют нелинейный характер, определяемый именно процессом резания.

В свою очередь, для идентификации состояния элементов станка более всего подходит режим его функционирования на холостом ходу, при котором вибрационные характеристики в целом определяются работой его деталей и узлов — подшипниками, шестеренными, ременными передачами, шариково-винтовыми парами, приводными механизмами. При работе на холостом ходу станка в ряде случаев наблюдается незначительный уровень вибрации, что обусловливает применение высокочувствительной аппаратуры, позволяющей фиксировать необходимые частотные характеристики, а также суммировать измеряемые характеристики для расчета средних значений, которые наиболее полно характеризуют состояние исследуемых объектов.

Колебания элементов динамически нагруженных узлов станка являются основными источниками вибраций, возникающих при работе, причем частотные составляющие и амплитуды вибраций определяются как дефектами отдельных элементов, установленных на валах, так и погрешностями сборки и эксплуатации.

Отличительной особенностью вибраций вращающихся элементов и деталей является то, что наибольшие амплитуды наблюдаются в поперечном направлении, а вибрационный сигнал хорошо передается по корпусным деталям.

Таким образом, при установке датчика на корпусе узла можно получить исходную информацию о вибрационном состоянии параметров каждого подшипника и параметров шарико-винтовых пар. Но следует учитывать, что вибрационный сигнал значительно затухает при передаче его через большое количество сопряжений между деталями.

При работе оборудования в подшипниках генерируются вибрации в широком частотном диапазоне. Появление вибраций в подшипниках обусловлено их конструктивными особенностями. Составляющие элементы, совершающие сложное кинематическое движение с различными угловыми скоростями, приводят к возникновению спектра вибраций в диапазоне от низких до высоких частот. Кроме того, появлению вибраций способствуют неточности деталей подшипников, образовавшиеся при их изготовлении. Это разностенность наружного и внутреннего кольца, некруглость и шероховатость тел качения и дорожек колец, погрешности, вызванные дефектами сборки узлов, в том числе перекос наружных и внутренних колец, дисбаланс вращающихся валов.

В процессе эксплуатации подшипников возникают следующие дефекты: износ беговых дорожек колец, образование на них задиров, износ тел качения и сепаратора, некруглость тел вращения, образование трещин в сепараторах. Зарождение и развитие каждого дефекта характеризуется соответствующими частотами и изменениями амплитуд колебаний.

Подшипник качения является самым распространенным и наиболее уязвимым элементом основных узлов и механизмов металлорежущего станка. Подшипники осуществляют пространственную фиксацию и воспринимают основную часть статических и динамических усилий, возникающих в механизме.

Вибросигнал несет в себе большое количество информации о состоянии как самого подшипника, так и его элементов, но в первоначальном виде вибросигнал не позволяет определить степень развития дефекта. Для получения более полной картины о состоянии подшипника используют различные методы и средства анализа и преобразования вибросигнала.

Рассмотрим основные методы оценки технического состояния подшипников качения, основанные на анализе вибрационного сигнала.

Диагностика по спектру вибросигнала или метод прямого спектра.

Метод основан на анализе вибрационного сигнала с точки зрения периодичности появления амплитудных всплесков (рис.1).

Вибрационный сигнал анализируется узкополосным спектральным анализатором и по частотному составу спектра можно идентифи-

sb815.indd 39 27.07.2015 15:01:14

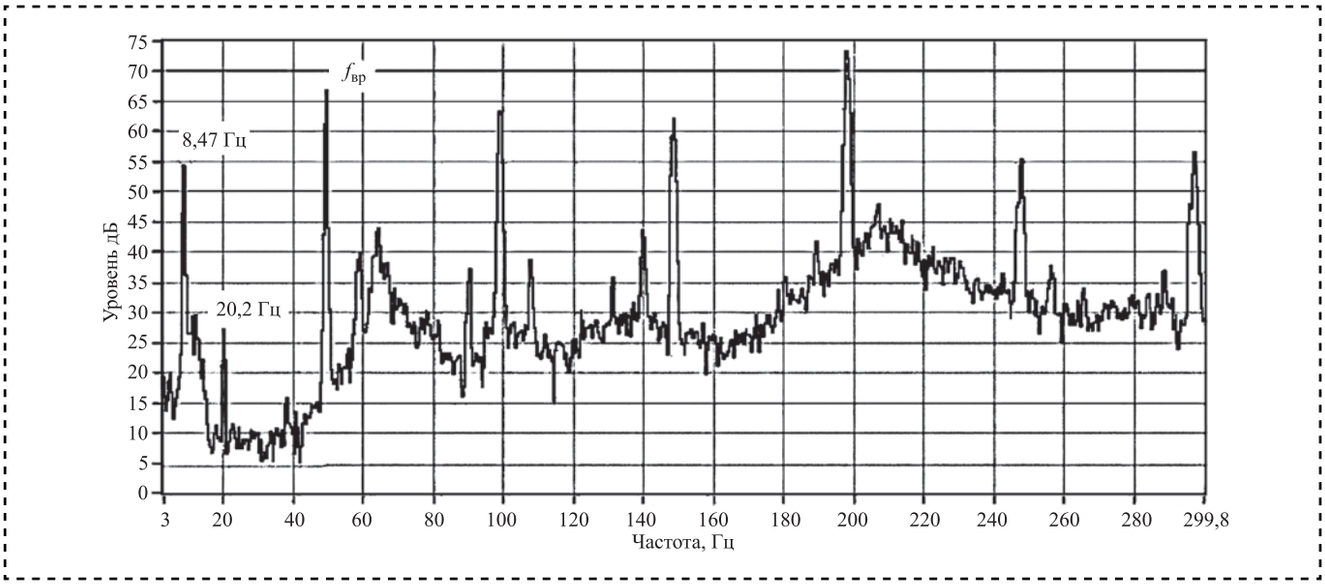

Рис. 1. Прямой спектр вибрации

цировать возникновение и развитие дефектов подшипника.

Амплитудные всплески в вибросигнале следуют не хаотично, а с определенной периодичностью или частотой. Причем дефекту на каждом элементе подшипника, будь то тела качения, дорожки или сепаратор, соответствуют свои частоты, которые однозначно просчитываются в зависимости от кинематики подшипника и скорости его вращения. Наличие той или иной дискретной составляющей в спектре сигнала говорит о возникновении соответствующего дефекта подшипника, а амплитуда этой составляющей характеризует глубину дефекта. Это несколько упрощенный подход, поскольку многие дефекты в спектре проявляются в виде нескольких частотных составляющих.

Достоинства метода:

достаточно высокая помехозащищенность (маловероятно наличие в механизме источников, создающих вибрации на тех же точно частотах, что и дефекты подшипника);

высокая информативность. Метод дает возможность получить дифференцированную оценку состояния подшипника отдельно по каждому его кинематическому узлу, поскольку они генерируют разные частотные ряды в спектре.

Недостатки метода:

высокая стоимость (самый простой узкополосный спектральный анализатор стоит намного дороже любого виброметра);

низкая чувствительность к зарождающимся и слабым дефектам. Это связано с тем, что подшипник в большинстве механизмов является очень маломощным источником вибрации. Небольшой скол на шарике или дорожке не в состоянии повлиять на механизм так, чтобы можно было увидеть соответствующую частотную составляющую в спектре вибрации. И только при достаточно сильных дефектах амплитуды этих частотных составляющих начинают заметно выделяться над общей шумовой частью спектра.

Диагностика по спектру огибающей вибросигнала.

Высокочастотная, шумовая часть сигнала меняет свою амплитуду во времени, т.е. она модулируется неким более низкочастотным сигналом. Именно в этом модулирующем сигнале содержится информация о состоянии подшипника. Выделение и обработка этой информации составляют основу рассматриваемого метода.

Установлено, что наилучшие результаты этот метод дает в том случае, если анализировать модуляцию не широкополосного сигнала,

sb815.indd 40 27.07.2015 15:01:14

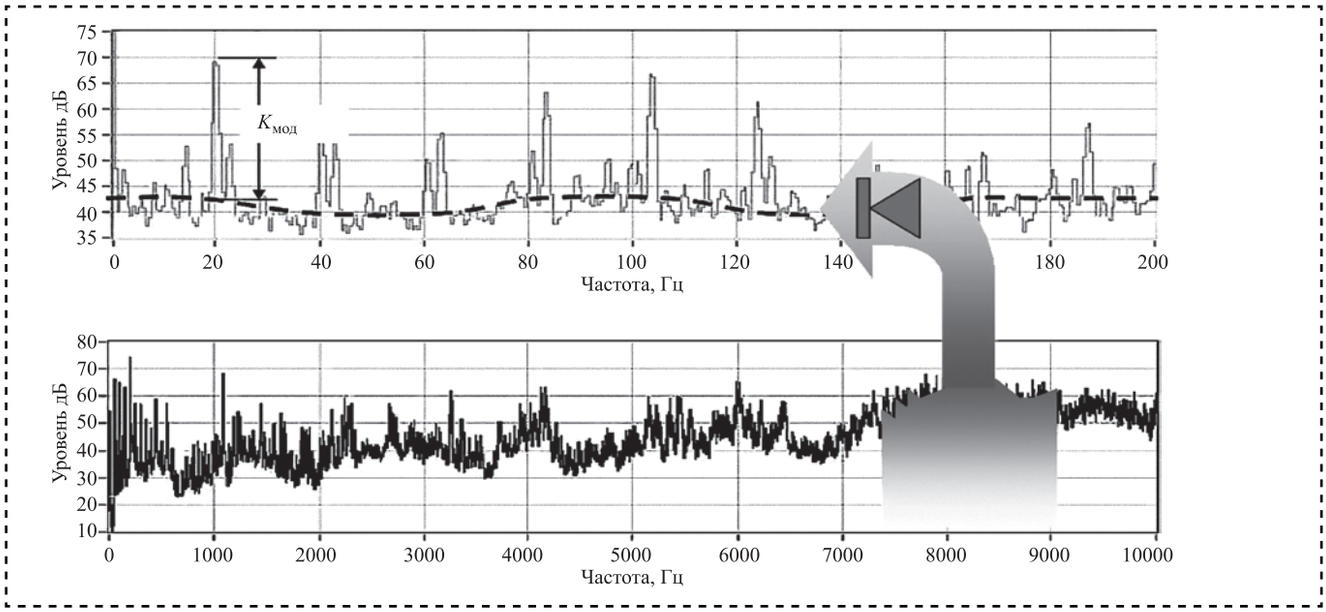

Рис. 2. Метод спектра огибающей вибросигнала

получаемого от акселерометра, а предварительно осуществить полосовую фильтрацию вибросигнала в диапазоне примерно от 4 до 20 кГц и анализировать модуляцию этого сигнала. Для этого отфильтрованный сигнал детектируется, т.е. выделяется модулирующий сигнал, который подается на узкополосный спектроанализатор, и получаем спектр интересующего модулирующего сигнала или спектр огибающей (рис. 2).

Небольшие дефекты подшипника не в состоянии вызвать заметные вибрации в области низких и средних частот, генерируемых подшипником. В то же время для модуляции высокочастотных вибрационных шумов энергии возникающих ударов оказывается вполне достаточно, т.е. метод обладает очень высокой чувствительностью. Спектр огибающей всегда имеет очень характерный, специфический вид. При отсутствии дефектов он представляет собой почти горизонтальную (слегка волнистую) линию. При появлении дефектов над уровнем этой достаточно гладкой линии сплошного фона начинают возвышаться дискретные составляющие, частоты которых однозначно просчитываются по кинематике и оборотам подшипника. Частотный состав спектра огибающей позволяет идентифицировать наличие дефектов, а превышение соответствующих составляющих над фоном однозначно характеризует глубину каждого дефекта.

Достоинства метода:

высокая чувствительность;

информативность;

помехозащищенность.

Недостатки метода:

высокая стоимость;

определенная сложность реализации.

Как правило, алгоритм обработки и анализа реализуется с использованием компьютерной техники.

Метод ПИК-фактора.

Для контроля технического состояния подшипников по этому методу необходимо иметь простой виброметр, позволяющий измерять два параметра вибросигнала:

среднеквадратичное значение (СКЗ) уровня вибрации, т.е. энергии вибрации;

пиковую амплитуду (ПИК) вибрации.

Отношение параметров ПИК/СКЗ называется ПИК-фактором. Осциллограмма вибросигнала нового хорошо смазанного подшипника имеет стационарный двухполярный сигнал шумового характера, симметричный относительно временно́й оси.

С течением времени, по мере появления дефектов на кинематических узлах подшипника,

sb815.indd 41 27.07.2015 15:01:15

в вибросигнале начнут появляться отдельные короткие амплитудные пики, соответствующие моментам соударения дефектов.

В дальнейшем с развитием дефекта сначала увеличиваются амплитуды пиков, потом постепенно увеличивается и их количество. Появившись вначале, например, на одном из шариков, он создает забоину на кольце, с него она переносится на другой шарик, дефекты шариков начинают вырабатывать сепаратор и т. д. до полного разрушения.

Зависимости значений ПИК и СКЗ представляют собой монотонные, неубывающие функции одинакового характера, но смещенные друг относительно друга во времени. На рис. 3 представлены зависимости ПИК, СКЗ и ПИК-фактора от времени развития дефекта.

Сначала по мере появления и развития дефекта нарастает функция ПИК, а СКЗ меняется очень мало, поскольку отдельные, очень короткие амплитудные пики практически не меняют энергетические характеристики сигнала. В дальнейшем с увеличением количества пиков начинает увеличиваться энергия сигнала, возрастает СКЗ вибрации.

Достоинства метода:

низкая стоимость;

простота реализации.

Недостатки метода:

слабая помехозащищенность;

необходимость проводить многократные измерения.

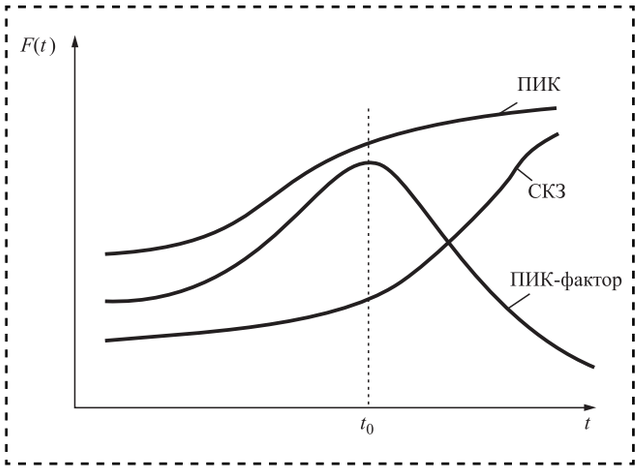

Рис. 3. Метод ПИК-фактора

Метод ударных импульсов.

Метод основан на измерении и регистрации механических ударных волн, вызванных столкновением двух тел. Ускорение частиц материала в точке удара вызывает волну сжатия, которая распределяется в виде ультразвуковых колебаний. Ускорение частиц материала в начальной фазе удара зависит только от скорости столкновения и не зависит от соотношения размеров тел.

Период времени мал, и заметной деформации не происходит. Величина фронта волны является мерой скорости столкновения двух тел. Во второй фазе удара поверхности двух тел деформируются, энергия движения отклоняет тело и вызывает в нем колебания. Для измерения ударных импульсов используется пьезоэлектрический датчик, на который не оказывают влияния фон вибрации и шум.

Вызванная механическим ударом фронтальная волна сжатия возбуждает затухающие колебания в датчике (преобразователе). Пиковое значение амплитуды этого затухающего колебания прямо пропорционально скорости удара. Поскольку затухающий переходный процесс очень хорошо определяется и имеет постоянную величину затухания, его можно отфильтровать от других сигналов (сигналов вибрации).

Изменение и анализ затухающего переходного процесса — основа метода ударных импульсов. Наблюдаемый процесс аналогичен тому, как отзывается на удары камертон. Как бы вы по нему ни ударили — он звенит на своей собственной частоте. Так и подшипниковые узлы от соударения дефектов "звенят" на своей частоте.

Частота эта практически всегда лежит в диапазоне 28...32 кГц, и в отличие от камертона эти колебания очень быстро затухают, поэтому на осциллограммах они выглядят практически как импульсы, что и дало название методу. Результаты измерений очень легко нормировать по скорости соударения, зная геометрию подшипника и его обороты.

Амплитуды ударных импульсов однозначно связаны со скоростью соударения дефектов и

sb815.indd 42 27.07.2015 15:01:15

глубиной дефектов. Поэтому по амплитудам ударных импульсов можно достоверно диагностировать наличие и глубину дефектов.

Достоинства метода:

высокая чувствительность;

информативность и помехозащищенность;

простота и доступность в реализации (существуют портативные приборы).

Недостатки метода:

существует одно ограничение, связанное с конструктивным исполнением механизма. Поскольку речь идет об измерении ультразвуковых волн колебаний, которые очень сильно затухают на границах разъемных соединений, для точности измерений необходимо, чтобы между наружным кольцом подшипника и местом установки датчика существовал сплошной массив металла. В большинстве случаев это не вызывает проблем.

Метод широко используется в среде профессионалов, прост и доступен персоналу, обслуживающему оборудование.

Вибрация, создаваемая подшипником качения, характеризуется следующими основными частотами, связанными с элементами подшипников [2]:

частота вращения сепаратора относительно наружного кольца

$$f_{\text{с}} = \frac{1}{2} f_{\text{вр}} \left\{ 1 - \frac{d_{\text{т.к}}}{d_{\text{с}} \cos\alpha} \right\}, \quad (1)$$

где $f_{\text{вр}}$ — частота вращения подвижного кольца относительно неподвижного; $d_{\text{т.к}}$ — диаметр тела качения; α — угол контакта тел и дорожек качения; $d_{\text{с}} = 1/2(d_{\text{н}} - d_{\text{в}})$ — диаметр сепаратора, $d_{\text{н}}$ — диаметр наружного кольца, $d_{\text{в}}$ — диаметр внутреннего кольца;

частота перекатывания тел качения по наружному кольцу

$$f_{\text{н}} = \frac{1}{2} f_{\text{вр}} \left\{ 1 - \frac{d_{\text{т.к}}}{d_{\text{с}} \cos\alpha} \right\} z = f_{\text{с}} z, \quad (2)$$

где z — число тел качения;

частота перекатывания тел качения по внутреннему кольцу

$$f_{\text{в}} = \frac{1}{2} f_{\text{вр}} \left\{ 1 + \frac{d_{\text{тк}}}{d_{\text{с}} \cos\alpha} \right\} z = \left(f_{\text{вр}} - f_{\text{с}} \right) z; \quad (3)$$

частота вращения тел качения относительно поверхности колец

$$f_{\text{т.к}} = \frac{\frac{1}{2} f_{\text{вр}} d_{\text{с}}}{d_{\text{т.к}} \left\{ 1 - \frac{d_{\text{т.к}}^2}{d_{\text{с}}^2 \cos^2\alpha} \right\}}. \quad (4)$$

Получив частоты вращения основных элементов подшипника, можно проанализировать и отфильтровать спектр вибрационного сигнала, определив тем самым пиковые амплитуды колебаний этих элементов, соответствующие моментам соударения в местах дефектов. По полученным данным проводится исследование характера дефекта и степени его развития, позволяющее также выявить зарождающиеся дефекты.

Выводы

Техническое диагностирование является объективным методом оценки технического состояния динамически нагруженных узлов и механизмов металлорежущего оборудования в целях определения наличия или отсутствия дефектов, степени их развития и сроков проведения ремонта, в том числе прогнозирования технического состояния оборудования. Правильный выбор методов и средств технической диагностики позволит значительно сократить потери времени и денежных средств.

Библиографический список

1. **ГОСТ 2 7518—87** Диагностирование изделий. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1989.

2. **Балицкий Ф.Я.**, **Барков А.В.**, **Баркова Н.А.** Неразрушаемый контроль: справ. М.: Машиностроение, 2005. Т. 7. Кн. 2. 829 с.

sb815.indd 43 27.07.2015 15:01:15

УДК 621:519.242

А.Я. Дмитриев, *канд. техн. наук (Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева),*
Т.А. Митрошкина *(Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева, ООО "Новое качество", г. Самара),*
Е.В. Шутемова *(ООО "Новое качество", г. Самара),*
А.В. Кончиц, *канд. техн. наук (ООО "Аутолив", г. Тольятти)*
E-mail: dmitriev57@rambler.ru, www.new-quality.ru

Совершенствование сборочных процессов с использованием методики планирования экспериментов ЛИС—ХИН и метода анализа рисков FMEA

Рассмотрены особенности обеспечения качества сборочных процессов автомобильного производства. Приведены основные положения использования методики ЛИС—ХИН при идентификации корневых причин несоответствий или дефектов продукции. Предложено принимать решение о корневых причинах несоответствий на основе расчета риска по аналогии с методом FMEA.

The quality assurance features of assembly processes of the automobile production were considered. The basic points of the methodology LIS-HIN concerning root causes identification of product nonconformities were presented. The decision of root causes was proposed to take based on risk calculation same as FMEA.

Ключевые слова: сборочный процесс, методика ЛИС—ХИН, FMEA, метод Шайнина, несоответствие, корневая причина, анализ риска.

Keywords: assembly process, methodology LIS-HIN, FMEA, Shainin method, nonconformity, root cause, risk analysis.

При производстве автокомпонентов на современных производственных площадках отечественных предприятий (например, ЗАО "Самарская кабельная компания", ОАО "Завод имени А.М. Тарасова" и др.) и зарубежных компаний (например, Autoliv, Delphi Automotive PLC, Yazaki, Robert Bosch GmbH и др.) особое внимание уделяется обеспечению качества производства. В связи с этим применяются различные инструменты и методы повышения качества, такие как диаграммы Исикава, Парето, контрольные карты, QFD, FMEA, MSA, 5WHY, 8D, SPC, метод Шайнина, методика ЛИС—ХИН и др. [1—6].

Наибольший интерес для совершенствования сборочных процессов представляют метод Шайнина и методика ЛИС—ХИН (ЛИС — лучший из существующих образцов, ХИН — худший из несоответствующих образцов).

Дориан Шайнин известен как автор методики Shainin DOE (design of experiments) и консультант в области качества более чем 800 ведущих компаний в США. В компании Motorolla есть поговорка: "Without Deming, U.S. would not have had a quality philosophy; without Juran, it would not have had a quality direction; without Shainin, it would not have solved quality problems!" [3]. Дориан Шайнин рассматривал процесс улучшения качества производственных процессов через нахождение и устранение причин вариаций. Он выделял следующие причины вариации производственных процессов [3]:

Red X — корневая причина, составляющая обычно по меньшей мере 50 % процентов от величины проблемы (Green Y), которая должна быть решена;

Pink X — причина, составляющая от 20 до 30 % от Green Y;

Pale Pink X — причина, составляющая 10...15 % от Green Y.

В развитие метода Шайнина была разработана методика ЛИС—ХИН. Основными отличиями данной методики от классического

sb815.indd 44 27.07.2015 15:01:15

планирования эксперимента и метода Шайнина являются особый алгоритм применения инструментов для нахождения Red X, адаптированные инструменты для инженеров, более легкий процесс обнаружения причины несоответствия за счет сравнения ЛИС- и ХИН-образцов (в отличие от метода Шайнина, где сравниваются соответствующие образцы с несоответствующими), наличие методики отбора ЛИС- и ХИН-образцов [2, 4].

Методика ЛИС—ХИН является менее ресурсоемкой, более достоверной и простой в применении. Она ориентирована на соответствие требованиям потребителя, а не технической документации. Несоответствие преобразуется в техническую задачу, далее определяются ЛИС- и ХИН-образцы, проводится оценка сходимости измерительной системы, определяется семейство вариации с наибольшим отличием в ЛИС- и ХИН-образцах и выявляется несоответствующий компонент.

Методика ЛИС—ХИН применяется для обнаружения корневой причины несоответствия в автосборочном производстве для того, чтобы можно было разделить влияние процесса сборки узла и влияние качества деталей и выделить определенную сборочную операцию или деталь, влияющую на возникновение несоответствия [2, 4].

Для определения корневой причины несоответствия в сборочном процессе узла или в его компонентах применяется инструмент "Локализация причины несоответствия". Сборочный процесс имитируется путем трехкратного разбора и сборки ЛИС- и ХИН- узлов. Если критический компонент может быть разобран и собран без разрушающего воздействия, то его принимают за сборочный узел и проводят "Локализацию причины несоответствия". Если критический компонент нельзя подвергнуть разборке-сборке без разрушающего воздействия, то необходимо замерить его параметры, применив инструмент "Оценка сходимости" относительно измерительной системы каждого компонента.

В дальнейшем применяется инструмент "Анализ порядковой корреляции", который включает следующие этапы:

из всей совокупности автомобилей (деталей) выбирается $m \geqslant 3$ ЛИС-образцов и $n \geqslant 3$ ХИН-образцов;

задается уровень значимости α, например равный 5 % (или 0,05);

измеряются параметры образцов, которые могут повлиять на несоответствие;

ранжируются образцы с присвоением каждому статуса ЛИС или ХИН;

вычисляется индекс поляризации I_p.

Относительная разрешающая способность (ОРС) измерительной системы $I_{\text{ОРСпар}}$ вычисляется по формуле

$$I_{\text{ОРСпар}} = \Delta P_{\text{пар}}/\Delta M_{\text{пар}},$$

где $\Delta P_{\text{пар}}$ — разброс значений параметра; $\Delta M_{\text{пар}}$ — вариация измерения параметра.

Если $I_{\text{ОРСпар}}$ меньше шести, то измерительная система является недостаточно точной и применять данную измерительную систему нельзя.

Если показатель $I_{\text{ОРСпар}}$ равен шести и выше, то проводится "Анализ порядковой корреляции" [2].

Рабочим рядом для индекса поляризации I_p, равного k, является π_k. Если $I_p = k$, а $\pi_k < \alpha$ (уровень значимости), то данный параметр считается критическим (значимым) параметром несоответствия.

Если $I_p = k$, а $\pi_k \geqslant \alpha$, то выборку необходимо дополнить еще одной парой ЛИС- и ХИН-образцов и продолжить исследование. Если $\pi_k \geqslant \alpha$ повторяется трижды, то исследование прекращается и подтверждается отсутствие корреляции данного параметра и несоответствия.

Особое внимание уделяется уровню значимости α. Для проверки истинности гипотезы о корневой причине рассчитанное значение показателя π_k сравнивается с теоретическим значением, выбранным с заданным уровнем значимости.

Выделяют два вида гипотез: нулевая (основная) H_0 и альтернативная (конкурирующая) H_1 [2]. На основании статистического критерия гипотеза H_0 или принимается как верная, или отвергается как неверная.

В случае, если верная гипотеза отвергается, то совершается ошибка первого рода.

sb815.indd 45 27.07.2015 15:01:15

Таблица 1

Шкала уровня значимости

Последствие	Балл *S*	Критерий значимости	α
Критическое	10 9 8	Вероятность ошибки первого рода критическая. ЛИС- и ХИН-образцы не могут быть определены в принципе	⩾ 0,1
Значительное	7 6	Вероятность ошибки первого рода значительная. Критерий для оценки параметра выбран верно. ЛИС- и ХИН-образцы могут быть определены	> 0,067
Оптимальное. Нет последствий	5	Вероятность ошибки первого рода средняя. ЛИС- и ХИН-образцы определены	> 0,045
Слабое	4	Вероятность ошибки первого рода низкая. ЛИС- и ХИН-образцы определены	> 0,034
Очень слабое	3 2	Вероятность ошибки первого рода очень низкая. ЛИС- и ХИН-образцы однозначно определены	> 0,001
Незначительное	1	Вероятность ошибки первого рода исключена. ЛИС- и ХИН-образцы однозначно определены	⩽ 0,001

Для оценки возможности совершения такой ошибки применяют вероятность α (уровень значимости критерия). Результат проверки гипотез и выводы зависят от выбранного уровня значимости α. В большинстве случаев критическим уровнем значимости считается 5 %.

Стандартными уровнями значимости являются 10 %, 5 %, 1 %, 0,1 %. В зависимости от объема выборки следует брать и соответствующий уровень значимости. Для автомобильной промышленности параметр уровня значимости расположен в границах от 1 до 10 % (или от 0,01 до 0,1).

Предлагается принимать решение о корневой причине несоответствия продукции по аналогии с методом FMEA (failure mode and effects analysis — анализ видов и последствий потенциальных несоответствий). Ранжирование баллов значимости в методе FMEA проводится на основе показателя уровня значимости α (табл. 1).

Для расчета приоритетного числа риска (ПЧР), являющегося комплексной оценкой риска, также необходимо знать балл возникновения *O* и балл обнаружения *D*.

В предложенном подходе показатель π_k является основой для ранжирования баллов возникновения (табл. 2), а значение относительной разрешающей способности $I_{\text{ОРСпар}}$ является основой для ранжирования баллов обнаружения (табл. 3) [1]. Показателю π_k соответствует вероятность возникновения (*O-occurrence*) [1, 2].

Комплексная оценка риска несоответствия рассчитывается по формуле

$$\text{ПЧР} = S \times O \times D.$$

Далее на основе полученного значения ПЧР принимается решение о корневой причине несоответствия: наименьший риск ошибки принятия решения соответствует меньшему значению ПЧР.

Рассмотрим пример определения причины несоответствия " завышенное усилие поднятия стекла задней боковой двери автомобиля". Были замерены четыре размера двери: A_1, A_2, A_3, A_4. Подтвердилось, что измерительная система удовлетворительна. Далее были сняты размеры с пяти ЛИС-образцов и пяти ХИН-образцов дверей автомобиля.

В результате применения метода последовательного анализа для уровня значимости α = 0 ,05 методики ЛИС—ХИН были определены соответственно показатели π_k и $I_{\text{ОРСпар}}$

sb815.indd 46 27.07.2015 15:01:15

Таблица 2

Шкала вероятности возникновения

Вероятность разделения	Балл *O*	Критерии вероятности разделения	π_k
Критическая	10	ЛИС- и ХИН- образцы не могут быть однозначно определены	⩾1,0
Малая	9	Разделение ЛИС- и ХИН-образцов затруднено	<1,0
Очень низкая	8 7	Низкая вероятность разделения ЛИС- и ХИН-образцов	< 0,8
Низкая	6 5 4	ЛИС- и ХИН-образцы могут быть определены	<0,3
Умеренная	3	ЛИС- и ХИН-образцы определены	<0,1
Высокая	2	ЛИС- и ХИН-образцы однозначно определены	<0,01
Очень высокая	1	ЛИС- и ХИН-образцы однозначно и окончательно определены	⩽0,001

Таблица 3

Шкала вероятности обнаружения

Обнаружение	Балл *D*	Критерии вероятности обнаружения	$I_{\text{ОРС пар}}$
Почти невозможно	10	ЛИС- и ХИН-образцы не определены	⩽ 1
Очень плохое	9	Очень низкая вероятность обнаружения ЛИС- и ХИН-образцов	<2
Плохое	8	Низкая вероятность обнаружения ЛИС- и ХИН-образцов	<4
Очень слабое	7	Очень слабая вероятность обнаружения ЛИС- и ХИН-образцов	<6
Слабое	6	Слабая вероятность обнаружения ЛИС- и ХИН-образцов	<8
Умеренное	5	ЛИС- и ХИН-образцы могут быть определены	<10
Умеренно хорошее	4	Умеренная вероятность обнаружения ЛИС- и ХИН-образцов	<15
Хорошее	3	Высокая вероятность обнаружения ЛИС- и ХИН-образцов	<20
Очень хорошее	2	Очень высокая вероятность обнаружения ЛИС- и ХИН-образцов	<25
Почти наверняка	1	ЛИС- и ХИН-образцы однозначно определены	⩾25

Таблица 4

Данные для расчета ПЧР

Размер двери	Значимость		Возникновение		Обнаружение	
	α	*S*	π_k	*O*	$I_{\text{ОРСпар}}$	*D*
A_1	0,05	5	0,635	7	2,14	8
A_2	0,05	5	0,238	5	9,33	5
A_3	0,05	5	0,810	9	7,89	6
A_4	0,05	5	0,008	2	22,22	2

(табл. 4). Для этих значений по табл. 1—3 были выбраны баллы значимости *S*, возникновения *O* и обнаружения *D*, необходимые для расчета ПЧР.

По данным табл. 4 рассчитаны ПЧР:

$$\text{ПЧР } (A_1) = 5 \cdot 7 \cdot 8 = 280;$$

$$\text{ПЧР } (A_2) = 5 \cdot 5 \cdot 5 = 125;$$

$$\text{ПЧР } (A_3) = 5 \cdot 9 \cdot 6 = 270;$$

$$\text{ПЧР } (A_4) = 5 \cdot 2 \cdot 2 = \underline{\mathbf{20}}.$$

sb815.indd 47 27.07.2015 15:01:15

Наиболее достоверным решением о причине несоответствия (собственно причиной несоответствия) в таком случае является размер A_4, так как риск принятия ошибочного решения минимален.

Таким образом, для совершенствования сборочных процессов предложен подход к принятию решения о корневой причине несоответствия продукции, который позволяет дифференцированно рассчитывать риск принятия решений и тем самым обоснованно и эффективно использовать ресурсы для полного устранения несоответствия или дефектов продукции.

Библиографический список

1. **Вашуков Ю.А., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А.** Анализ видов, последствий и причин потенциальных несоответствий (FMEA). Самара: Изд. Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева, 2008. 20 с.
2. **Кончиц А.В.** Поиск несоответствующего компонента при обнаружении причин несоответствий в автомобильном производстве // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 2. С. 22—29.
3. **Bhote Keki R., Bhote Adi K.** World Class Quality // Using Design of Experiments to Make It Happen. American Management Association. New York, 2010. 487 p.
4. **Кончиц А.В., Митрошкина Т.А.** Новый подход к идентификации несоответствий в автомобильном производстве на основе метода планирования экспериментов // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2010. Т. 12. № 4-4. С. 882—884.
5. **Родионов В.Н., Попова Т.В., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А.** Метод разработки инноваций с учетом рисков в производстве автотракторных проводов // Кабели и провода. 2011. № 1 (326). С. 10—14.
6. **Родионов В.Н., Попова Т.В., Дмитриев А.Я., Митрошкина Т.А.** Инновационное преобразование рабочих мест на основе интеграции методов QFD и FMEA // Методы менеджмента качества. 2011. № 8. С. 30—35.

ООО "Издательство **"Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение"**.
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 269-54-98, факс 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* *Корректор Сажина Л.И.*
Сдано в набор 22.06.2015. Подписано в печать 22.07.2015. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

sb815.indd 48 27.07.2015 15:01:15