

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ  
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

1 2012  
(138)

## СОДЕРЖАНИЕ

### Технологичность конструкции

- Кашуба Л.А. Реальная геометрия детали . . . . . 3  
Попов А.М. Повышение сборочной технологичности конструкции изделий  
в интегрированных системах автоматизированного проектирования . . . . . 14

### Сборочное оборудование и его элементы

- Ланщиков А.В., Колганов Е.А. К вопросу затяжки резьбовых соединений  
пневматическими поршневыми гайковертами . . . . . 20

### Современные технологии сборки

- Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Анализ собираемости изделий типа "вал-втулка"  
при селективной сборке . . . . . 23  
Черняховская Л.Б., Симаков Д.А. Кинематика и динамика процесса сборки  
цилиндрических деталей . . . . . 27

### Сборка с использованием клеев

- Безменов В.С., Игнатов А.В. Автоматизация сборки клеевых соединений  
в машиностроении с высоковязкими и пастообразными клеевыми композициями . . . 33

### Обеспечение качества. Испытания. Контроль

- Горелов А.С., Прейс В.В. Управление качеством автоматизированной сборки  
многоэлементных изделий массового выпуска на основе статистических  
методов . . . . . 40

### В помощь конструктору, технологу

- Матросова Ю.Н., Малова Е.С. Программное обеспечение для автоматизиро-  
ванного проектирования фрез . . . . . 44

### Информация

- Указатель статей, опубликованных в 2011 году . . . . . 47

**Председатель  
редакционного совета**  
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

### Редакционный совет

**МОСКВА**  
А.С. ВАСИЛЬЕВ  
(главный редактор)  
А.А. ГУСЕВ  
М.В. ВАРТАНОВ  
А.М. ДАЛЬСКИЙ  
И.Н. ЗИНИНА  
Ю.Л. ИВАНОВ  
Ю.Г. КОЗЫРЕВ

А.И. КУМЕНКО  
А.В. МЕДАРЬ  
Е.А. МИКРИН  
В.В. ПОРОШИН  
Б.В. ШАНДРОВ  
А.А. ШАТИЛОВ  
А.Г. ХОЛОДКОВА  
Г.А. ЯРКОВ

### Региональные редсоветы

**БЕЛГОРОД**  
Н.А. ПЕЛИПЕНКО

**БРЯНСК**  
О.А. ГОРЛЕНКО

**ВЛАДИВОСТОК**  
Ю.Н. КУЛЬЧИН  
А.А. СУПОНЯ  
В.М. КОРНИЕНКО

**ВОЛГОГРАД**  
В.Г. КАРАБАНЬ  
М.Г. КРИСТАЛЬ  
В.И. ЛЫСАК  
В.М. ТРУХАНОВ

**ИЖЕВСК**  
И.В. АБРАМОВ  
Б.А. ЯКИМОВИЧ  
В.Г. ОСЕТРОВ

**КАЗАНЬ**  
Р.И. АДГАМОВ

**КОВРОВ**  
Ю.З. ЖИТНИКОВ

**КОЛОМНА**  
Ю.Д. АМИРОВ

**КОМСОМОЛЬСК-  
НА-АМУРЕ**  
Б.Н. МАРЬИН  
В.И. ШПОРТ  
А.М. ШПИЛЕВ

**НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ**  
С.В. ДМИТРИЕВ  
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ

**НИЖНИЙ НОВГОРОД**  
С.В. ГОЛУБЕВ

**ОМСК**  
В.Н. КОСТЮКОВ

**ОРЕЛ**  
Ю.С. СТЕПАНОВ

**БЕЛГОРОД**  
Г.А. ХАРЛАМОВ

**ОРЕНБУРГ**  
А.Н. ПОЛЯКОВ  
А.И. СЕРДЮК  
А.П. ФОТ

**РЫБИНСК**  
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ  
В.В. НЕПОМИЛУЕВ  
А.Н. СЕМЕНОВ

**САМАРА**  
М.А. ЕВДОКИМОВ  
Ю.А. ВАШУКОВ  
Г.А. КУЛАКОВ  
В.А. НИКОЛАЕВ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
В.Ф. КУЗЬМИН  
Е.В. ШАЛОБАЕВ

**ТОЛЬЯТТИ**  
А.И. РЫЖКОВ  
Б.Ф. ХАЗОВ

**ТУЛА**  
В.В. ПРЕЙС

**ХАБАРОВСК**  
В.А. ЛАШКО

### Украина

**КИЕВ**  
А.С. ЗЕНКИН  
В.А. МАТВИЕНКО

**ДОНЕЦК**  
А.Н. МИХАЙЛОВ

**СЕВАСТОПОЛЬ**  
Е.Л. ПЕРВУХИНА

### Беларусь

**МИНСК**  
В.Л. БАСИНЮК  
М.Л. ХЕЙФЕЦ

**ГОМЕЛЬ**  
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ

### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом  
отделении (индексы по каталогу "Роспечать" – 79748, Объединенному каталогу "Пресса  
России" – 84967, каталогу "Почта России" – 60257) или непосредственно в издательстве  
Тел.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. 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.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

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

THE MONTHLY  
NEWSMAGAZINE  
FOR SCIENTISTS  
AND MANUFACTURERS

# ASSEMBLING



## IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS  
THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

1 2012  
(138)

### CONTENTS

#### *Manufacturability of a construction*

- Kashuba L.A.** Real geometry of the detail . . . . . 3  
**Popov A.M.** Increase of assembly adaptability to manufacture of a design of products  
in integrated systems of the automated designing . . . . . 14

#### *Production tools and machinery for assembly*

- Lanschikov A.V., Kolganov E.A.** To a question of an tightening of threaded  
connections by the pneumatic piston nut runner . . . . . 20

#### *Modern technologies in assembly*

- Sorokin M.N., Anurov Yu.N.** The analysis of a collecting of products of type  
"shaft-plug" at selective assembly . . . . . 23  
**Chernyakhovskaya L.B., Simakov D.A.** Cylindrical details assembly process  
dynamics and kinematics . . . . . 27

#### *Assembly with use glue*

- Bezmenov B.S., Ignatov A.V.** The adhesive assembling automatization  
in machine engineering using high-viscosity and pastelike adhesive compositions . . . . 33

#### *Quality assurance. Testing. Monitoring*

- Gorelov A.S., Prejs V.V.** Quality management of the automated assemblage  
of multielement products of mass release on the basis of statistical methods . . . . . 40

#### *Industrial and design engineer's aid*

- Matrosova Yu.N., Malova E.S.** software for automated design of cutters . . . . . 44

#### *Information*

- Index** of articles published in 2011 . . . . . 47

**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.M. DALSKY  
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  
V.M. KORNIENKO

##### **VOLGOGRAD**

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

##### **IZHEVSK**

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

##### **KAZAN**

R.I. ADGAMOV

##### **KOVROV**

Yu.Z. ZHITNIKOV

##### **KOLOMNA**

Yu.D. AMIROV

##### **KOMSOMOLSK-ON-AMUR**

B.N. MARJIN  
V.I. SCHPORT  
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

##### **RYBINSK**

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

##### **SAMARA**

M.A. EVDOKIMOV  
Yu.A. VASHUKOV  
G.A. KULAKOV  
V.A. NIKOLAEV

##### **ST.-PETERSBURG**

V.F. KUZMIN  
E.V. SHALOBABEV

##### **TULA**

V.V. PREYS

##### **TOLIATI**

B.F. KHAZOV  
A.I. RYZHKOV

##### **KHABAROVSK**

V.A. LASHKO

##### **Ukraine**

##### **KIEV**

A.S. ZENKIN  
V.A. MATVIENKO

##### **DONETSK**

A.N. MIKHAILOV

##### **SEVASTOPOL**

E.L. PERVUKHINA

##### **Belarus**

##### **MINSK**

V.L. BASINJUK  
M.L. KHEIFETZ

##### **GOMEL**

V.E. STARZHINSKI

#### **Executive editors of current issue:**

Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

Journal is distributed on subscription, which can be issued 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) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.

http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru

Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building" 107076, Moscow, Stromynsky per. 4

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.

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media. Registration certificate ПИ № 77-1747, February 25, 2000

Free price

УДК 514.851

Л.А. Кашуба, канд. техн. наук, доцент (МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: leonid-ak@mail.ru

## Реальная геометрия детали\*

Геометрия номинальных элементов представлена в номинальной системе координат и в системе координат проекта. Реальная геометрия пространственных элементов отличается от номинальной геометрии по форме и расположению. Представлен способ определения отклонений формы и расположения пространственных реальных элементов от номинальной формы и расположения.

Nominal geometry elements is presented in nominal coordinate system and coordinate the project. Real geometry of spatial elements is different from the nominal geometry of the shape and location. The article shows how to determine the deviations of form and spatial location of the actual elements of the face shape and location.

**Ключевые слова:** номинальный элемент, реальный элемент, номинальная система координат, система координат системы измерения, отклонение формы, отклонение расположения, погрешности формы и расположения.

**Keywords:** nominal element, real element, nominal system of coordinates, system of coordinates of system of measurement, form deviation, deviation of an arrangement, form and arrangement error.

### Реальная геометрия пространственных элементов

В качестве примера определения положения отсчетных элементов рассмотрим обычный вал, номинальный объем которого ограничен цилиндрической поверхностью и двумя торцовыми плоскостями (рис. 16).

На рис. 16, а представлена в номинальной системе координат условная проекция детали на плоском чертеже, а на рис. 16, б — ее изображение в пространстве.

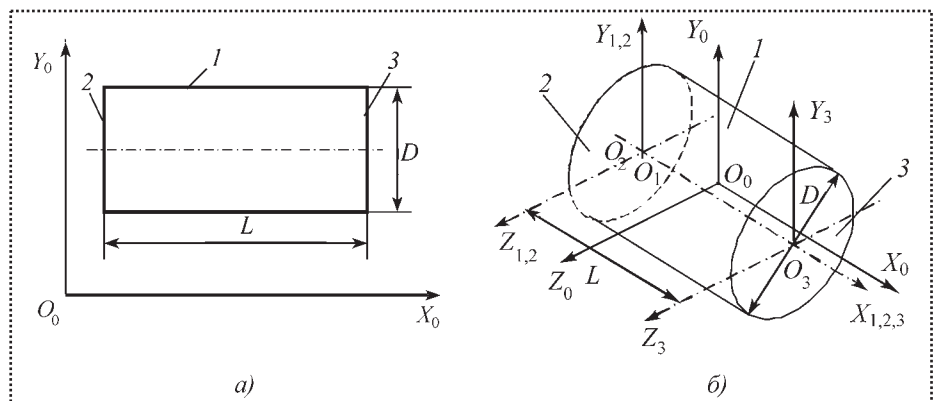


Рис. 16. Геометрия детали на плоском чертеже (а) и 3D модели (б): 1–3 — поверхности; D — диаметр; L — длина

\* Окончание, начало в № 8, 2011 г.

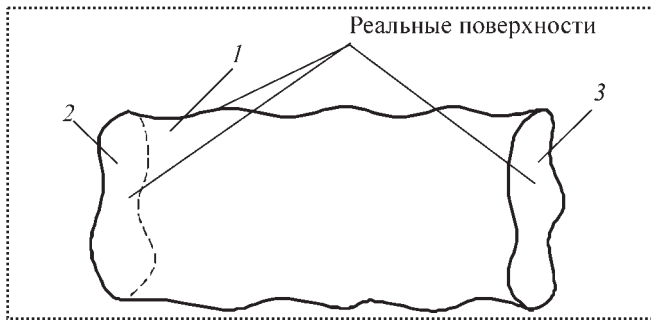


Рис. 17. Реальная геометрия

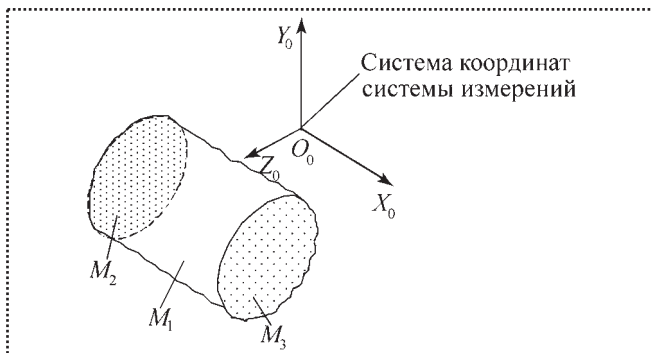
Отклонение расположения реальных элементов по отношению к элементу, принятому за реальную базу в системе координат системы измерения, определяется по отличию их расположения от расположения номинальных систем координат номинальных элементов в системе координат одноименного номинального элемента, принятого за базу, в исходной системе координат проекта.

Реальная геометрия элемента может быть как больше, так и меньше номинальной геометрии. Интервалы (допуски) отклонения формы, за пределы которых не должна выходить реальная форма поверхности ограничивают отклонения реальной геометрии. Для определения отклонений формы остается только один вариант – *номинальный элемент*, или *номинальная геометрия элемента в номинальной системе координат*, что полностью по смыслу соответствует стандарту.

Если в качестве отсчетного элемента для определения отклонений формы выбрана номинальная форма элемента, то основной проблемой является определение расположения номинальной системы координат с номинальным элементом в системе координат системы измерения для определения отклонения формы реального элемента.

Пусть массивы ("облака") точек реальных поверхностей измерены трехкоординатной координатно-измерительной машиной (КИМ).

После измерения в системе координат системы измерения определены координаты  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$ ,  $z_{ij}$  точек ре-


 Рис. 18. Массивы точек ( $M_1 - M_3$ ), измеренных КИМ

альных поверхностей детали. Здесь индекс  $i$  – номер точки на  $j$ -й поверхности ( $i = 1...n; j = 1...m$ ) – рис. 18.

Поверхностей всего три: два торца, "похожие на плоскости" и одна боковая, "похожая на цилиндр". Координаты точек реальных поверхностей цилиндрической детали в системе координат системы измерения можно представить массивами  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  значений координат точек каждой из реальных поверхностей.

Требуется определить отклонения расположения и формы реальных поверхностей от их отсчетных номинальных значений, заданных в системе координат проекта.

Как подойти к определению отсчетных поверхностей? Рассматривать всю деталь как целое, или по отдельным поверхностям, ограничивающим объем детали?

Переход от рассмотрения номинальной формы детали к реальным формам поверхностей, ограничивающих объем детали, сулит большие перспективы при решении задач определения отклонений формы и расположения поверхностей и оптимизации допусков на них в конструкторской и технологической документации.

Что здесь первично и что вторично?

Для решения поставленной задачи нужно:

- во-первых, определить номинальные системы координат каждой номинальной поверхности детали в системе координат проекта;
- во-вторых, выбрать номинальную базу в системе координат проекта и относительно нее определить положение номинальных поверхностей в номинальной системе координат базы;
- в-третьих, определить расположение отсчетных элементов (поверхностей) и их номинальных систем координат в системе координат системы измерения для определения отклонений формы от номинальных поверхностей детали;
- в-четвертых, выбрав базу в системе координат системы измерения найти положение номинальных систем координат номинальных поверхностей относительно выбранной базы и определить отклонения систем координат реальных поверхностей от такого же расположения номинальных систем координат относительно номинальной базы.

Несмотря на то, что в соответствии с ГОСТ 24642–81 [1] отклонение формы реального элемента определяется как отклонение точек реальной геометрии элемента от номинальной геометрии, определяемое по нормали к номинальному элементу в пределах нормируемого участка, для поверхностей (пространственных объектов) предлагаются те же варианты отсчетных элементов:

*прилегающий элемент* – элемент, имеющий форму номинального, соприкасающийся с реальным и расположенный вне материала детали так, чтобы отклонение от наиболее удаленной точки реального эле-





мента поверхности в пределах нормируемого участка имело минимальное значение;

*средний элемент* — элемент, имеющий форму номинального и такие размеры и/или расположение, чтобы сумма квадратов расстояний между реальным и средним элементами в пределах нормируемого участка имела минимальное значение.

Прилегающие элементы выбраны в стандарте ГОСТ 24642–81 [1] для поверхностей, похожих на плоскость, цилиндр, поверхности произвольной формы.

Прилегающая плоскость может быть материализована реальной плоскостью поверочной плиты, выполненной с высокой точностью и устанавливаемой на реальную поверхность\*. Это дорогой инструмент, изготавливаемый как калибры. Однако реализовать этим инструментом алгоритм поиска положения поверочной плиты на реальной поверхности не всегда возможно, поскольку возникают проблемы, связанные с определением расстояния от реальной поверхности до плоскости, особенно в случаях, когда прилегающая плоскость ляжет на одну, две или три точки контакта.

Решение одно — попытаться вычислить искомое положение прилегающей плоскости в "облаке точек", принадлежащих реальной поверхности, "похожей" на плоскость.

Для этого необходимо:

- выбрать систему координат, в которой будут определены точки реальной поверхности, "похожей" на плоскость;
- определить с помощью средства измерения (например, КИМ) координаты точек реальной поверхности;
- выбрать систему координат, в которой задана прилегающая плоскость;
- разработать алгоритм, с помощью которого можно найти положение прилегающей плоскости в системе координат измеренных значений точек реальной поверхности.

В качестве критерия, обеспечивающего определение положения (привязку) прилегающей плоскости к точкам, принадлежащим реальной поверхности, "похожей" на плоскость, можно использовать минимум функции ( $\epsilon_{\max}$ )  $\rightarrow \min$  при условии касания с внешней по отношению к реальной поверхности стороны (снаружи) и непересечения реальной поверхности прилегающей плоскостью.

Критерий может быть *однозначно* удовлетворен при касании прилегающей плоскости к реальной по-

\* Для использования в качестве эталонной отсчетной поверхности, а также как вспомогательного приспособления при разметочных поверочных и контрольных работах в качестве опорных и установочных поверхностей при сборке различных машин и агрегатов применяют плиты поверочные гранитные (ТУ-2-034-802–74) и чугунные (ГОСТ 10905–86).

верхности для *одной выступающей точки касания* в пределах нормируемого участка.

Таких точек в пределах нормируемого участка может быть много. Последовательно переходя от точки к точке можно найти такую точку, которая обеспечит выполнение критерия.

При наличии *двух точек касания* найти однозначное решение, переходя от одной пары точек касания к другой не всегда возможно. Прилегающих плоскостей, имеющих одно и то же наименьшее значение максимального отклонения, великое множество. Это обусловлено погрешностями измерения координат точек реальной поверхности и вычисления положения прилегающей поверхности. Как выбрать единственное положение прилегающей плоскости?

А если прилегающая плоскость ляжет на три точки? Таких прилегающих плоскостей также много. Среди них есть подмножество прилегающих плоскостей, имеющих одно и то же наименьшее значение максимального отклонения. Как и в предыдущем случае возможно наличие нескольких прилегающих плоскостей с разным положением их в системе координат точек реальной поверхности. Какую из них выбрать? Возникает неопределенность. Решение в этом случае неоднозначно. Как быть в таком случае при приемке продукции, если результаты вычислений неоднозначны?

Для прилегающего цилиндра материальный носитель формы с непрерывно изменяющимся диаметром прилегающего цилиндра нереализуем.

Единственный выход — попытаться вычислить искомое положение прилегающего цилиндра в "облаке точек", принадлежащих реальной поверхности, "похожей" на цилиндр.

Выберем систему координат, в которой будут определены точки реальной поверхности, "похожей" на цилиндр и определим с помощью средства измерения (например, КИМ) координаты точек реальной поверхности.

Выберем систему координат, в которой задан прилегающий цилиндр, и разработаем алгоритм, с помощью которого можно найти положение оси прилегающего цилиндра в системе координат измеренных значений точек реальной поверхности и его диаметр.

В качестве критерия, обеспечивающего определение положения (привязку) прилегающей плоскости к точкам, принадлежащим реальной поверхности, "похожей" на цилиндр, в соответствии с ГОСТ 24642–81 [1] рекомендуется использовать минимум функции ( $\epsilon_{\max}$ )  $\rightarrow \rightarrow \min$  при условии касания с внешней по отношению к реальной поверхности стороны (снаружи) и непересечения реальной поверхности прилегающим цилиндром.

Критерий может быть *однозначно* удовлетворен при касании прилегающего цилиндра к реальной поверхности для *трех выступающих точек* касания в пределах нормируемого участка. Таких прилегающих цилиндров может быть много. Среди них есть подмножество прилегающих цилиндров, имеющих одно



и то же наименьшее значение максимального отклонения. Как и в предыдущем случае возможно несколько прилегающих цилиндров с разным положением их в системе координат точек реальной поверхности. Какой из них выбрать? Возникает неопределенность. Решение в этом случае неоднозначно. Как быть в таком случае при приемке продукции, если результаты вычислений неоднозначны?

Таким образом, из-за *технической нереализуемости* и *неоднозначности* результатов вычислений положений прилегающих элементов, используемых в качестве *отсчетных* по отношению к реальным элементам *прилегающие элементы не приемлемы для определения отклонения формы реальных элементов*.

**Средние элементы** определяются по правилу  $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \rightarrow \min$ , где  $\varepsilon_i$  – расстояние от  $i$ -й точки реальной поверхности по нормали до отсчетной поверхности при условиях соответствия формы отсчетной поверхности форме поверхности, заданной в конструкторской документации.

Средние элементы, в отличие от прилегающих, всегда однозначны. Число точек, описывающих реальный элемент при его дискретизации при выбранной верхней частоте функции, описывающей этот элемент, всегда конечно. Следовательно, его положение, вычисленное по сумме квадратов отклонений, описывающее критерий поиска положения средней линии также конечно и однозначно. Из-за однозначности они могут быть использованы для определения положения расположения реальных элементов. Вопрос состоит в том, а что вписывать в облако точек реальной поверхности, чтобы найти необходимое положение номинальной поверхности в системе координат системы измерения для определения отклонений формы?

Следует отметить, что при поиске положения отсчетной поверхности в системе координат системы измерения следует учитывать кривизну поверхностей.

По ГОСТ 24642–81 [1] средний элемент имеет ту же форму, что и номинальный. Это справедливо только для одной поверхности – плоскости.

Положение средней плоскости в системе координат системы измерения, до которой сумма квадратов отклонений точек реальной поверхности минимальна, определяют, пользуясь распространенной механической аналогией. Из механики известно, что если точкам реальной поверхности приписать единичные массы, то средняя плоскость проходит через центр тяжести системы, имеющий координаты  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ , вычисленные по средним арифметическим значениям координат точек, а нормаль к средней плоскости совпадает с направлением, дающим данной механической системе направление одного из главных центральных моментов инерции.

Для поверхностей, имеющих кривизну, отличную от нуля, это не так. Уравнение среднего элемента от-

личается от уравнения номинального. Это приводит к противоречию при обязательной необходимости определения отклонения формы реальной геометрии от номинальной геометрии.

Существенным недостатком выбора номинального элемента в качестве среднего элемента является то, что не учитывается величина реального элемента.

Остается только один приемлемый вариант – в качестве элемента, обеспечивающего однозначную привязку положения номинальной системы координат к массиву точек реального элемента в системе координат системы измерения для определения отклонения реального элемента от номинального элемента, принять *подобранную эквидистанту к номинальному элементу*. Величину этой эквидистанты с номинальной системой координат и номинальной геометрией элемента следует подобрать так, чтобы при размещении ее среди точек реальной геометрии элемента *минимум суммы квадратов отклонений эквидистанты от точек реального элемента был наименьшим из возможных* [4].

Для задания положения каждой номинальной поверхности, ограничивающей объем каждого изделия, определенной в системе координат системы измерения  $O_{ni}X_{ni}Y_{ni}Z_{ni}$ , где  $i$  – порядковый номер поверхности, необходимо связать каждую отсчетную эквидистантную поверхность с соответствующей номинальной системой координат. Тогда положение номинальных поверхностей изделия будет определено положением этих систем координат в системе координат системы измерения  $O_0X_0Y_0Z_0$ .

Для определения положения номинальной системы координат поверхности в системе координат системы измерения воспользуемся отмеченным ранее [1] сравнением взаимного расположения характерных точек поверхностей в номинальной системе координат проекта и в системе координат системы измерения.

В отличие от плоского (2D) варианта [4], когда положение номинальной системы координат с номинальной геометрией элемента в системе координат системы измерения определяется по совмещению двух характерных точек эквидистанты и реального элемента, для определения положения поверхности в трехмерном (3D) пространстве необходимо не две, а три достаточно удаленные друг от друга характерные точки, лежащие на номинальной поверхности. Одним из требований, предъявляемых к расположению этих характерных точек, является недопустимость их расположения на одной прямой. Привязка номинальной системы координат к характерным точкам реальной поверхности может быть осуществлена и по двум характерным точкам, лежащим на поверхности, и направлению нормали или оси симметрии, проходящим через одну из них.

В системе координат проекта координаты этих характерных точек отмечают как реперные знаки и их



координаты определяют с помощью КИМ в системе координат системы измерения.

Расстояния между реперами в системе координат системы измерения могут быть одинаковыми или неодинаковыми с теми же расстояниями в системе координат проекта или в номинальной системе координат номинальной геометрии элемента.

Если расстояния одинаковы, то после совмещения характерных точек собственная система координат реальной поверхности, построенная на характерных точках номинальной поверхности, обеспечивает определение положения номинальной системы координат элемента (реальной поверхности) в системе координат системы измерения.

Если расстояния неодинаковы, то в номинальной системе координат элемента определяют эквидистанту к нему и расположение на ней эквидистантных одноименных характерных точек, соответствующих характерным точкам на номинальной поверхности. После совмещения характерных точек реальной поверхности с одноименными характерными точками эквидистантных поверхностей определяется расположение номинальной системы координат элемента в системе координат системы измерения.

В данной задаче (см. рис. 17) для номинальной цилиндрической поверхности, имеющей кривизну, в 3D необходимо отметить и определить координаты трех характерных точек (реперных знаков). Они должны принадлежать поверхности, быть разнесены достаточно далеко друг от друга и не лежать на одной прямой. В номинальной системе координат детали  $O_0X_0Y_0Z_0$  на номинальной цилиндрической (искривленной) поверхности определим три удаленные точки  $I'$ ,  $2'$  и  $3'$ , и отметим их координаты:  $x'_1, y'_1, z'_1; x'_2, y'_2, z'_2$  и  $x'_3, y'_3, z'_3$ . Положение характерных точек определено в номинальной системе координат (рис. 19, а).

Измерим в системе координат КИМ множества точек каждой из поверхностей цилиндрической детали, в том числе и отмеченные характерные точки, получившие в системе координат системы измерения значения  $x_1^*, y_1^*, z_1^*; x_2^*, y_2^*, z_2^*$  и  $x_3^*, y_3^*, z_3^*$  (рис. 19, б).

Есть все основания считать, что реальная геометрия элемента по результатам измерения с помощью КИМ не совпадает с номинальной геометрией.

Впишем эквидистантные элементы (для цилиндра) в реальный элемент. Сравним расстояния между точками  $I'$ ,  $2'$  и  $3'$  в номинальной системе координат

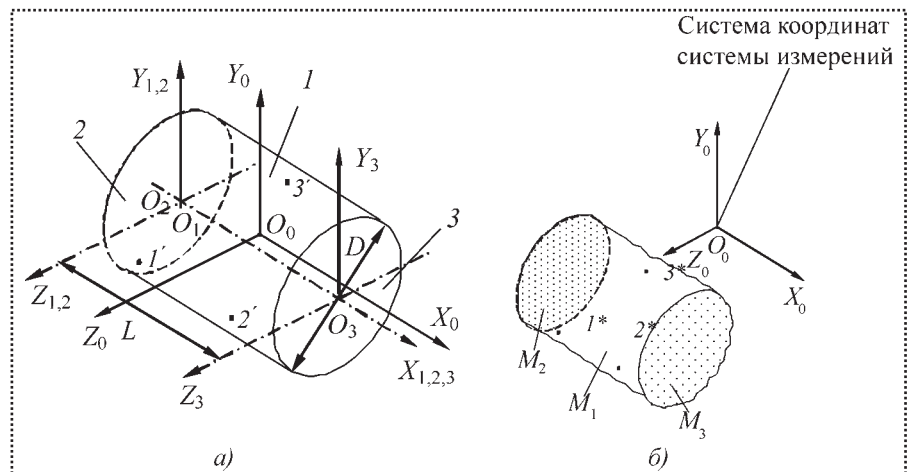


Рис. 19. Реперные знаки при проектировании и измерении:

а – нанесение реперных знаков на номинальную поверхность; б – измерение координат реперных знаков на реальной поверхности

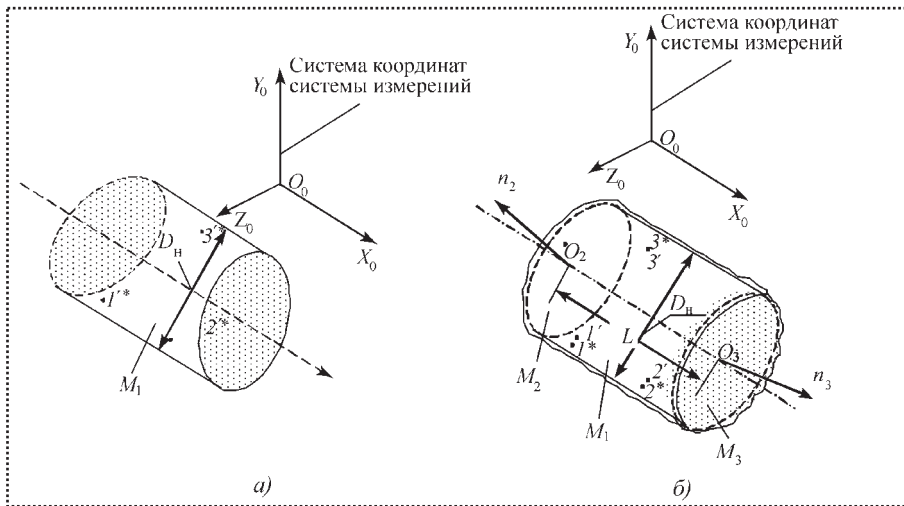
(рис. 19, а) с расстоянием между точками  $1^*$ ,  $2^*$  и  $3^*$  в системе координат системы измерения (рис. 19, б).

Если эти расстояния одинаковы, то совместим характерные точки номинальной поверхности с одноименными характерными точками реальной поверхности. Это равносильно тому, что в массив точек  $M_1$  впишем бесконечно длинный цилиндр номинального диаметра методом минимума суммы квадратов отклонений реальной поверхности от номинальной. В результате такой процедуры совмещения привяжем номинальную систему координат к системе координат системы измерения, а с ней и номинальную поверхность, для определения отклонений формы. По характерным точкам определим положение и направление оси номинального цилиндра в пространстве координат системы измерения (рис. 20, а).

Если расстояния между одноименными характерными точками реального цилиндра и номинального неодинаковы, то подберем эквидистанту к номинальной поверхности, у которой расстояние между соответствующими характерными точками (например, между точками  $1'$  и  $2'$  или  $2'$  и  $3'$  или  $3'$  и  $1'$ ) на эквидистантной поверхности в номинальной системе координат элемента имеют такое же расстояние, как и расстояние между одноименными характерными точками (например между точками  $1^*$  и  $2^*$  или  $2^*$  и  $3^*$  или  $3^*$  и  $1^*$ ) в системе координат системы измерения (рис. 20, б). Это равносильно тому, что в массив точек  $M_1$  впишем бесконечно длинный цилиндр, эквидистантный номинальному, методом минимума суммы квадратов отклонений реальной поверхности от эквидистантной.

Рассмотрим процесс "вписывания" номинальных поверхностей в "облака измеренных точек" реальных торцовых поверхностей и оценим погрешности их расположения и формы.





**Рис. 20. Обработка данных измерений:**

*a* – определение положения оси эквидистанты к номинальной цилиндрической поверхности; *b* – определение нормалей к плоскостям торцов; 1 – номинальная плоскость; 2 – реальная поверхность; 3 – эквидистантный прилегающий цилиндр; 4 – эквидистантный цилиндр; 5 – границы коридора отклонения формы цилиндра; 6 – номинальная плоскость; 7 – реальная поверхность; 8 – границы коридоров отклонения формы от номинальных плоскостей; 9 – ось номинального и эквидистантного цилиндров; 10 – реальная поверхность; 11 – направление нормалей к номинальным плоскостям

Продолжим с "вписывания" в массивы точек  $M_2$  и  $M_3$  неограниченных по размерам плоскостей. Плоскость отличается отсутствием кривизны. Координаты точки, через которую проходит плоскость, определяются как центр тяжести облака измеренных точек, имеющих единичную массу, а направление нормали совпадает с направлением одного из главных центральных моментов инерции массива точек, принадлежащих этой реальной поверхности. Вычислим координаты произвольных точек, принадлежащих каждой плоскости, и направление их нормалей  $n_2$  и  $n_3$  в системе координат системы измерения (рис. 20, б).

Найдем отклонения точек реальных поверхностей от номинальных для плоскостей и цилиндра. Построим эквидистанты к поверхности вписанной номинальной цилиндрической поверхности по точке реального цилиндра, наиболее удаленной от оси номинального цилиндра.

Диаметр этого цилиндра будет искомым диаметром реального прилегающего цилиндра  $D_p$  (рис. 21). Построим плоскости, эквидистантные к найденным ранее торцовым плоскостям снаружи материала детали.

Вычислим координаты точек  $O_2$  и  $O_3$  пересечения оси отсчетного номинального цилиндра с плоскостями, эквидистантными отсчетными плоскостями снаружи детали (см. рис. 20). Расстояние между точками  $O_2$  и  $O_3$  будет равно длине детали.

Вся совокупность ответов на поставленные вопросы о параметрах реальной геометрии представлена на плоском рисунке (см. рис. 21).

Изложенные доказательства привели снова к прилегающим элементам, но определенным по другим правилам.

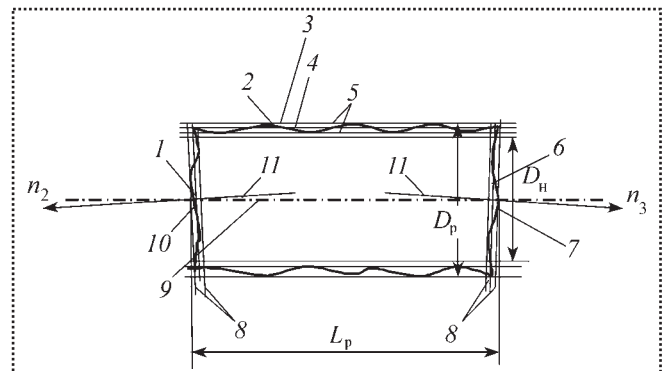
Эти правила заключаются в том, что привязку системы координат номинальной поверхности к геометрии (облаку точек) реальной поверхности в системе координат системы измерения осуществляют через эквидистанту к номинальной поверхности в номинальной системе координат. Размещая в облаке точек реальной геометрии эквидистанту с номинальной системой координат по минимуму суммы квадратов отклонений точек реальной поверхности от эквидистанты, находим положение системы координат эквидистанты в системе координат системы измерения. В этом случае система координат эквидистанты к номинальной поверхности будет системой координат реальной поверхности и **системой координат прилегающего эквидистантного элемента, находящегося**

**вне материала детали.**

Все приведенное ранее относится к расположению реальных элементов детали по отношению друг к другу и их форме по отношению к номинальной форме.

Откуда это можно узнать? Только после измерения координат точек поверхностей в системе координат системы измерения и привязки к реальной геометрии систем координат номинальных элементов (рис. 22).

При привязке номинальных систем координат к элементам с осевой симметрией и плоскостям, имеющим направление оси симметрии поверхности или нормали к плоскости вращения, необходимо особо выделять один из реперов. Эти реперы предотвратят возможный поворот номинальной системы координат элемента вокруг оси симметрии, приводящий к



**Рис. 21. Определение геометрических параметров детали**



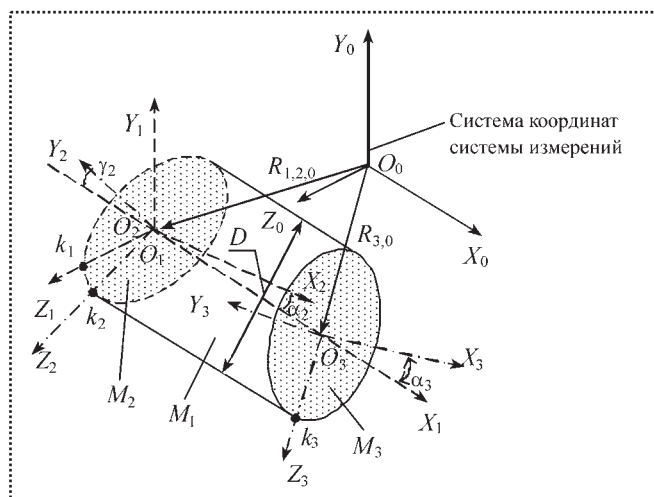


Рис. 22. Привязка номинальных систем координат к элементам с осевой симметрией и плоскостям с центральной симметрией

неопределенности положения номинальной его системы координат по отношению к геометрии реального элемента.

Сравнение положения системы координат реального элемента с номинальными положениями номинальных систем координат элементов и номинальной формой элементов в номинальной системе координат проекта позволит определить ее отличие (отклонение расположения и формы) от номинальной геометрии. Положение систем координат отсчетных поверхностей, полученное с помощью эквидистант к нормальным поверхностям, вписанных в реальные поверхности методом минимума суммы наименьших квадратов отклонений реальной поверхности от эквидистанты, и описанных снаружи реальных поверхностей определяет положение систем координат реальных поверхностей (см. рис. 22). Взаимное расположение систем координат реальных элементов относительно друг друга определяется по расположению систем координат эквидистантных элементов. Реальный элемент, относительно которого определяется расположение других реальных элементов, называют **базовым элементом** или **базой** [2]. В этой системе координат представлены все элементы с их реальной геометрией.

Определение расположения реальных сопрягаемых поверхностей детали в выбранной системе координат связано с векторно-матричным представлением положения системы координат в декартовой системе координат. Положение точки начала отсчета  $O_1$  системы координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  в системе координат системы измерения  $O_0X_0Y_0Z_0$  задают вектором  $R_{10}$ , а направление осей последующей системы координат в предыдущей декартовой системе координат  $O_0X_0Y_0Z_0$  задается матрицей  $A_{10}$ .

Такое представление удобно для математических преобразований, но не наглядно, поскольку элементами матрицы являются направляющие косинусы.

Положение и ориентацию осей последующей системы координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ , задаваемой в предыдущей системе  $O_0X_0Y_0Z_0$ , более удобно определять измеряемыми унифицированными геометрическими параметрами (УГП) (рис. 23).

Положение точки начала отсчета  $O_1$  системы координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  в системе координат системы измерения  $O_0X_0Y_0Z_0$  задают модулем радиус-вектора  $R_{10}$  и двумя углами  $\omega$  и  $\varphi$  сферической системы координат или проекциями радиус-вектора  $R_{10}$ :  $X_{01}$ ,  $Y_{01}$ ,  $Z_{01}$ . Направление осей системы координат  $O_1X_1Y_1Z_1$  в системе координат  $O_0X_0Y_0Z_0$ , параллельной предыдущей, задается: углом "перекоса"  $\alpha$  оси  $X_1$  относительно оси  $X'_0$ , углом направления перекоса  $\beta$  между осью  $Y'_0$  системы координат  $X'_0Y'_0Z'_0$ , параллельной базовой  $X_0Y_0Z_0$  и проекцией оси  $X_1$  на плоскость  $(X'_0Y'_0)$ , углом  $\gamma$  "закрутки" между осью  $Y'_0$  базовой системы координат  $X_0Y_0Z_0$  и проекцией оси  $Y_1$  на плоскость  $(X'_0Y'_0)$ . Углы  $\alpha$  и  $\omega$  отсчитываются от положительного направления оси  $X_0$ , соответственно, и изменяются в пределах от 0 до  $\pi$ . Углы  $\varphi$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  отсчитываются в направлении против хода часовой стрелки от оси  $Y_0$  к проекциям вектора  $R$  и осей  $X_1$ ,  $Y_1$ , соответственно, и изменяются от 0 до  $2\pi$ .

Переход от измеряемых УГП к векторно-матричным параметрам  $R_{10}$  и  $A_{10}$  в декартовой системе координат выполняется по соотношениям:

$$R_{10} = \begin{pmatrix} X_{01} \\ Y_{01} \\ Z_{01} \end{pmatrix} \text{ и } A_{10} = \begin{pmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{pmatrix},$$

где  $X_{01}$ ,  $Y_{01}$ ,  $Z_{01}$  – декартовы координаты точки начала отсчета СК  $X_1Y_1Z_1$ :

$$X_{01} = R_{10} \cos \omega;$$

$$Y_{01} = R_{10} \sin \omega \cos \varphi;$$

$$Z_{01} = R_{10} \sin \omega \sin \varphi;$$

$l_i$ ,  $m_i$ ,  $n_i$  – элементы матрицы  $A_{10}$  направляющих косинусов осей  $X_1$ ,  $Y_1$ ,  $Z_1$  относительно осей  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ :

$$l_1 = \cos \gamma / K, \quad l_2 = m_3 n_1 - m_1 n_3, \quad l_3 = \sin \alpha \cos \beta;$$

$$m_1 = \sin \gamma / K, \quad m_2 = n_3 l_1 - l_3 n_1, \quad m_3 = \sin \alpha \sin \beta;$$

$$n_1 = -K_1 / K, \quad n_2 = l_3 m_1 - l_1 m_3, \quad n_3 = \cos \alpha;$$

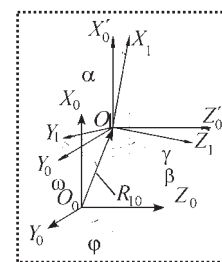


Рис. 23. Унифицированные геометрические параметры

$$K = (1 + K_1^2)^{0.5}; \quad K_1 = \operatorname{tg} \alpha \cos(\beta - \gamma).$$

Обратный переход из векторно-матричной формы к УГП выполняется по соотношениям:

$$R_{10} = \sqrt{X_{01}^2 + Y_{01}^2 + Z_{01}^2};$$

$$\omega = \arccos \left( \frac{Z_{01}}{\sqrt{X_{01}^2 + Y_{01}^2 + Z_{01}^2}} \right);$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}(Y_{10} / X_{10});$$

$$\alpha = \arccos n_3;$$

$$\beta = \operatorname{arctg}(m_3 / l_3);$$

$$\gamma = \operatorname{arctg}(m_1 / l_1).$$

В практической деятельности используется смешанная система параметров: координаты точки начала отсчета  $O_1$  системы координат  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$  задают в декартовой системе координат, а положение осей  $X_1, Y_1, Z_1$  – в УГП.

На рис. 24 представлено формирование систем координат эквидистантных прилегающих поверхностей осесимметричного элемента конструкции, ограниченного боковой цилиндрической поверхностью 2 и двумя плоскими торцами 1 и 3.

В системе координат системы измерения могут быть построены системы координат каждой реальной поверхности. Началами систем координат эквидистантных прилегающих поверхностей плоского торца

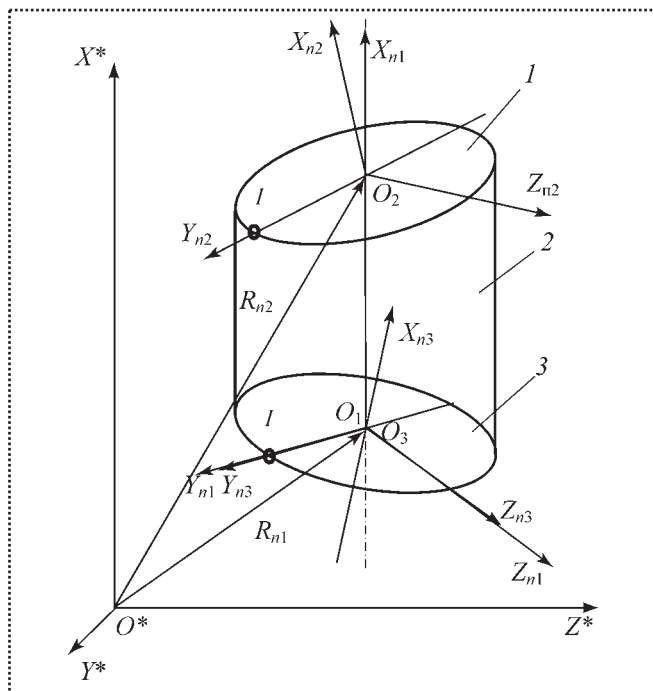


Рис. 24. К определению систем координат реальных поверхностей детали

детали будем считать точки  $O_2$  и  $O_3$  пересечения оси цилиндрической отсчетной поверхности с эквидистантными прилегающими поверхностями торцов. Формирование систем координат плоских торцов можно представить следующим образом. Нормали к отсчетным поверхностям (плоскостям торцов) с началом в центрах  $O_2$  и  $O_3$  образуют оси  $X_{n2}$  и  $X_{n3}$ . Оси  $Y_{n2}$  и  $Y_{n3}$  строят следующим образом. Через точки  $O_2$  и  $O_3$  и реперные знаки  $I$ , находящиеся на стыках отсчетных плоскостей и прилегающего эквидистантного цилиндра, проводят плоскость и в ней по нормали к осям  $X_{n2}$  и  $X_{n3}$  от центров  $O_2$  и  $O_3$  в сторону реперных знаков направляют ось  $Y_{n2}$  и  $Y_{n3}$ . Третьи оси –  $Z_{n2}$  и  $Z_{n3}$  – достраивают до правосторонних декартовых систем координат. Для цилиндрической эквидистантной прилегающей поверхности, ось которой проходит через центры торцов, начало координат располагают в одном из центров торцов ( $O_1$  совпадающего с  $O_3$ ), ось  $X_{n1}$  направляют вдоль направления оси  $O_1 - O_2$ , ось  $Y_{n1}$  строят в плоскости, проходящей через ось  $X_{n1}$  и реперный знак  $I'$ , находящийся на отсчетном цилиндре, ближайшем к началу координат, а третью ось достраивают по правилам, изложенным ранее. Положительное направление всех трех осей находится в одной полусфере.

Для формирования системы координат каждой из реальных поверхностей достаточно одного реперного знака на каждой из них. В качестве системы координат осесимметричного элемента конструкции может быть использована система координат любой из поверхностей, принятых за базовую. В качестве системы координат осесимметричного элемента конструкции может быть использована также система координат любой из поверхностей, принятых за базовую.

В ракетно-космическом машиностроении в качестве систем координат объекта производства применяют (см. рис. 24):

- систему координат, построенную на эквидистантной прилегающей поверхности торца 3;
- систему координат, построенную на боковой (цилиндрической) эквидистантной прилегающей поверхности 2.

В зависимости от выбранной схемы базирования изменяется состав погрешностей расположения поверхностей (рис. 25).

Если в качестве базовой системы координат  $O_6, X_6, Y_6, Z_6$  выбрана первая поверхность, то в ней определяют положение систем координат всех остальных поверхностей. Такую поверхность называют **основной базовой поверхностью**. В ней определены положения систем координат  $O_B, X_B, Y_B, Z_B$  другого торца (вспомогательной базовой поверхности) вектором  $R_B$  и матрицей  $A_B$  – систем координат  $O_1, X_1, Y_1, Z_1$  отсчетной цилиндрической боковой поверхности вектором  $R_1 = 0$  и матрицей  $A_1$  соответственно.

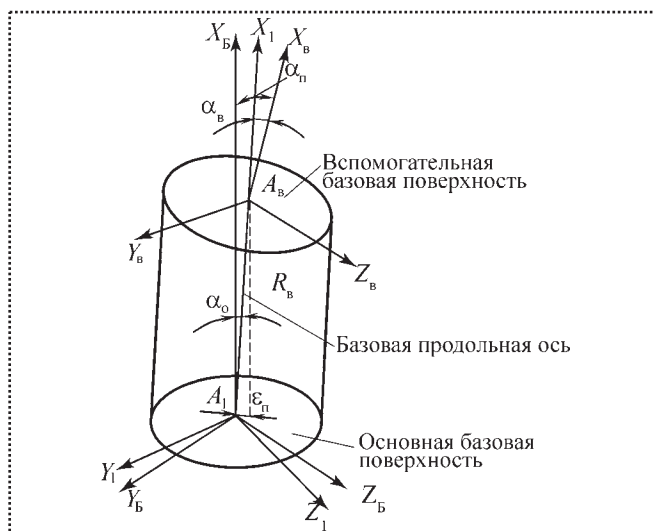


Рис. 25. Схемы задания систем координат осесимметричного элемента конструкции

Если в качестве базовой системы координат выбрана вторая, то ось  $X_1$  совпадает с отсчетной боковой поверхностью цилиндра и направлена от центра основной базовой к центру вспомогательной базовой поверхности. Ось  $Y_1$  строят в плоскости, проходящей через ось  $X_1$  и реперный знак  $I$  ближайшего к началу координат контролируемого сечения, а третью ось  $Z_1$  достраивают по правилам, изложенным ранее.

Если номинальное положение плоскостей торцов перпендикулярно оси цилиндра, а центры торцов лежат на оси, то в зависимости от способа формирования системы координат состав погрешностей взаимного расположения поверхностей в системе координат объекта производства будет различным. В первом случае в качестве погрешностей расположения для верхнего торца – смещение центра верхнего торца от номинального положения  $\epsilon_n$ , отклонение верхнего торца от параллельности  $\alpha_n$  и закрутка на угол  $\gamma$  оси  $Y_2$  вспомогательной поверхности по отношению к основной (нижнего торца). Во втором случае в качестве погрешности расположения отображающих поверхностей будут: погрешность расстояния между центрами торцов  $\Delta L$ ; закрутка на угол  $\gamma$  оси  $Y_2$  вспомогательной поверхности по отношению к основной; отклонение от перпендикулярности торцов  $\alpha_0$  и  $\alpha_B$ .

Системы координат получили специальные наименования. Первая – система координат основной базовой поверхности (СК ОБП), вторая – система координат базовой оси (СК БО).

Для поверхностей, номинальные координаты которых задаются координатами точек и правилами интерполирования в трехмерном пространстве (аэродинамические и гидродинамические поверхности), собственная система координат совпадает с номинальной, в которой эти точки заданы, или системой координат, связанной с эквидистантными характерными точками.

По известным из линейной алгебры соотношениям в системе координат проекта определим положение систем координат каждого номинального элемента, а в системе координат системы измерения определим положение систем координат каждого реального элемента.

Выбрав систему координат базы, определим положение системы координат каждого элемента в системе координат базы, как в системе координат проекта, так и в системе координат системы измерения. Для каждого элемента в системе координат базы определим расположение реального элемента относительно номинального [5]. Он будет сдвинут и повернут относительно номинального элемента.

Для каждого  $i$ -го элемента:

- номинальное расположение любого номинального элемента по отношению к номинальной базе в номинальной системе координат сводится к однозначному определению координат положения центра номинальной системы координат  $R_{nj}$ , и матрицы ее поворота  $A_{nj}$ ;
- реальное расположение любого реального элемента по отношению к базе в системе координат системы измерения сводится к однозначному определению координат положения центра  $R_{pj}$  и матрицы поворота  $A_{pj}$ ;
- сравнение реального положения системы координат реального элемента относительно номинального его положения в системе координат номинального элемента сводится к однозначному определению вектора смещения  $\Delta R_{p,nj}$  и матрицы поворота  $\Delta A_{p,nj}$  (рис. 26).

Здесь

$$\Delta R_{p,n} = A_n^T (R_p - R_n);$$

$$\Delta A_{p,n} = A_n^T A_p.$$

Перейдем к определению погрешностей расположения реальных элементов.

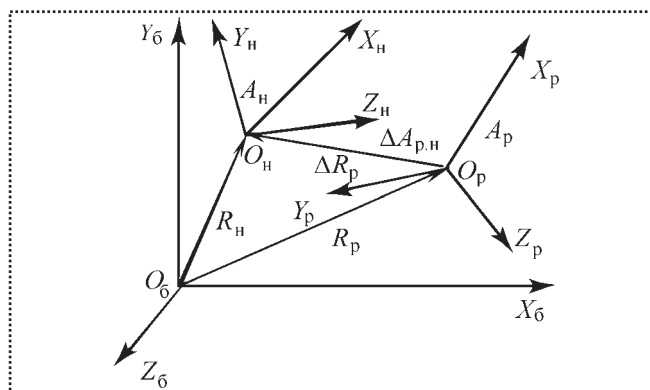


Рис. 26. Погрешности расположения реальных поверхностей относительно номинальных систем координат в системе координат базы



Погрешности расположения реальных элементов (поверхностей), к которым привязаны системы координат эквидистантной геометрии, определяются относительно номинальных элементов в системе координат базы [3, 5].

Погрешность расположения реального элемента по отношению к номинальному будет определяться двумя компонентами: вектором смещения  $\Delta R_{p,ni}$  и матрицей поворота  $\Delta A_{p,ni}$ .

Отклонение формы каждого реального элемента может быть получено после вычисления отклонения реальной геометрии от номинальной.

Для определения положения отсчетной поверхности в системе координат системы измерения используем системы координат реальных поверхностей реальных элементов.

Восстановим в них по эквидистантам исходную форму номинальных элементов в системах координат реальных элементов и определим отклонения формы реальных элементов относительно номинальной геометрии.

Если относительное положение систем координат реальных элементов и абсолютное отклонение формы реальных элементов, определенных по отношению к номинальным элементам равны или не превосходят поля допуска, то взаимное положение этих реальных элементов и отклонение их формы может считаться полностью соответствующим номинальной геометрии элементов в номинальной системе координат.

Определяя в системе координат системы измерения расположения систем координат реальных элементов относительно базы и отклонения формы относительно номинальной их геометрии в номинальной системе координат, получаем возможность ответить на все поставленные вопросы.

Таким образом, все условия оценки отклонения формы элементов от номинальной формы и их положения от номинального положения определены по отношению к номинальному расположению для элементов любой формы, а не только для элементов, имеющих форму прямой, круга, плоскости и цилиндра по одинаковому для всех форм поверхностей алгоритму.

На основе проведенного исследования можно построить укрупненный алгоритм обработки измерительной информации, полученной в системе координат системы измерения КИМ.

Конечная цель обработки информации, полученной КИМ в системе координат системы измерения — получение протокола обработки измеренных координат реальных поверхностей детали с указанием всех геометрических параметров отклонений формы и расположения всех поверхностей детали, исключая только скругления и фаски.

Возможный укрупненный алгоритм определения отклонения формы реальных элементов детали (поверхностей и линий) и их расположения в системе координат базы по сравнению с расположением в номи-

нальной системе координат проекта может быть осуществлен по следующей схеме:

1) создать номинальную 3D геометрию детали в номинальной системе координат проекта и определить в ней положение номинальной системы координат каждого номинального элемента (линии или поверхности);

2) выбрать базу (любую выбранную систему координат или номинальную систему координат одной из номинальных поверхностей) и определить в ней номинальное положение номинальных систем координат номинальных элементов;

3) на номинальной геометрии каждого элемента в номинальной системе координат определить координаты характерных точек, принадлежащих элементу и разнесенных на максимальное расстояние друг от друга:

- двух точек для плоского профиля;
- трех точек, не лежащих на одной прямой, принадлежащих одной поверхности или двух точек, одна из которых принадлежит одной поверхности, а через другую проходит направление оси симметрии или нормали к поверхности и запомнить их;

4) с помощью КИМ измерить и определить координаты массивов точек реальных элементов и отмеченных характерных точек реальных элементов в системе координат системы измерения;

5) измерить расстояния между характерными точками каждого элемента в системе координат системы измерений;

6) для элементов, имеющих кривизну:

- сравнив расстояния между номинальными характерными точками и одноименными реальными характерными точками, подобрать к каждому номинальному элементу эквидистанту в номинальной системе координат элемента, у которой расстояние между характерными точками будет равно расстоянию между измеренными одноименными точками в системе координат системы измерения;

- в системе координат системы измерения совместить одноименные измеренные характерные точки каждого элемента с соответствующими им характерными точками эквидистант в номинальной системе координат и по ним определить положение номинальных систем координат номинальных элементов в системе координат системы измерения;

- по положению номинальных систем координат номинальных элементов в системе координат системы измерения определить положение номинальных элементов в системе координат системы измерения;

- определить координаты номинальных элементов в системе координат системы измерения;

- по номинальным элементам, определенным в системе координат системы измерения, определить отклонения точек реальных элементов от номинальных элементов;

7) для элементов, не имеющих кривизны:

- найти центр тяжести измеренных точек и направления главных центральных осей инерции;





- выбрать направление прямой или нормали к плоскости;

- в системе координат системы измерения совместить одноименные измеренные характерные точки каждого элемента с соответствующими им характерными точками эквидистант в номинальной системе координат и по ним определить положение номинальных систем координат номинальных элементов в системе координат системы измерения;

- по положению номинальных систем координат номинальных элементов в системе координат системы измерения определить положение номинальных элементов в системе координат системы измерения;

- определить координаты номинальных элементов в системе координат системы измерения;

- определить отклонения точек реальных элементов от номинальных элементов;

8) определить положение системы координат реальной базы, в системе координат системы измерения одноименной с номинальной базой в номинальной системе координат;

9) по положению систем координат номинальных элементов в системе координат системы измерения определить отклонение расположения систем координат реальных элементов относительно системы координат базы;

10) вычислить параметры расположения элементов в терминах протокола измерения и сравнить с допустимыми значениями этих параметров;

11) оформить протокол результатов измерений с оценкой соответствия всех контролируемых параметров заданным полям допусков.

### Выводы

1) проведен анализ адекватности представления (описания) измеренной реальной геометрии поверхностей детали в действующих отечественных нормативных документах;

2) показано, что выбор прилегающих отсчетных элементов (поверхностей) по ГОСТ 24642–81 неприемлем из-за неоднозначности и нереализуемости для технических измерений двухточечными методами измерений;

3) для элементов, не имеющих кривизны (прямая или плоскость), в качестве однозначных отсчетных элементов определение отклонения формы реальных элементов могут быть использованы средние элементы, определяемые по минимуму суммы квадратов отклонений точек реальных элементов от элемента, имеющего ту же форму, что и номинальные. Их положение в системе координат системы измерения определяется положением центра тяжести массива точек реального элемента, а направление (ориентация в системе координат системы измерения) — в соответствии с направлениями главных центральных осей инерции того же массива точек;

4) для элементов, имеющих кривизну, в качестве однозначных отсчетных элементов при определении отклонений формы реальных элементов используются но-

минальные элементы в номинальной системе координат. Положение системы координат номинальных элементов в системе координат системы измерения определяется по минимуму суммы квадратов отклонений точек реального элемента от элемента эквидистантного к номинальному элементу в системе координат номинального элемента. Это же положение определяет положение системы координат реального элемента в системе координат системы измерения. По взаимному расположению систем координат реальных элементов могут быть определены отклонения расположения реальных элементов в системе координат системы измерения;

5) при соблюдении правил привязки номинальной системы координат номинальных поверхностей к системе координат системы измерения через элемент, эквидистантный номинальному, система координат реального элемента может быть отождествлена с системой координат эквидистантного элемента, прилегающего к реальному элементу;

6) отклонение формы реального элемента от номинальной имеет две компоненты:

- эквидистантное смещение относительно номинальной поверхности;

- искривление номинальной поверхности, аналогичное по смыслу волнистости и шероховатости;

7) отклонение расположения системы координат реального элемента от его номинального расположения в системе координат элемента, принятого за базу, также имеет две компоненты:

- смещение системы координат реального элемента относительно системы координат номинального элемента;

- поворот системы координат реального элемента относительно системы координат номинального элемента;

8) разработанная система представления реальной геометрии детали приемлема для любых форм номинальных поверхностей, ограничивающих объем детали и может быть использована для адекватной системы обработки данных измерений КИМ при контроле деталей машиностроения.

### Библиографический список

1. ГОСТ 24642–81. Допуски формы и расположения поверхностей. URL: <http://www.gostexpert.Ru/gost/gost-24642-81>.

2. ГОСТ 21495–76. Базирование и базы в машиностроении. URL: <http://gostexpert.Ru/gost/gost-21495-76>.

3. Кашуба Л.А. Особенности моделирования выходных геометрических параметров изделий ракетно-космического машиностроения в CAD/CAM системах: тезисы XXIX Академических чтений по космонавтике. М., 2005.

4. Кашуба Л.А. Реальная геометрия детали // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2011. № 8. С. 32–40; № 10. С. 7–15.

5. Тарасов В.А., Кашуба Л.А. Теоретические основы технологии ракетостроения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 351 с.



УДК 658.512.4

**А.М. Попов**, канд. техн. наук, доцент  
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: [merop@rostov.ru](mailto:merop@rostov.ru)

## Повышение сборочной технологичности конструкции изделий в интегрированных системах автоматизированного проектирования

Рассмотрены вопросы оценки и отработки конструкции изделий на технологичность в интегрированных системах автоматизированного проектирования (САПР). Подробно рассмотрена процедура анализа сборочной технологичности конструкции с помощью методологии DFMA. Приведен пример моделирования и оценки сборочной технологичности для нескольких вариантов конструкции изделия.

Questions of an estimation and working off of a design of products on adaptability to manufacture in integrated CAD/CAM are considered. Procedure of the analysis of assembly adaptability to manufacture of a design by means of methodology DFMA is in detail considered. The example of modelling and an estimation of assembly adaptability to manufacture for several variants of a design of a product is resulted.

**Ключевые слова:** технологичность конструкции, сборочная технологичность изделия, методология DFMA, моделирование сборочной технологичности, интегрированные САПР.

**Keywords:** manufacturability of a design, assembly adaptability to manufacture of a product, methodology DFMA, modelling of assembly adaptability to manufacture, integrated CAD/CAM.

Анализ технологичности конструкции изделия в ранних стадиях проектирования (концептуальное проектирование) из-за ограниченности информации о будущем технологическом процессе производства может основываться исключительно на качественных методах общей оценки их конструкционных параметров. Широкое распространение в литературе по технологичности конструкции получили общие принципы и правила, приводимые в виде рекомендаций ("технологично" – "нетехнологично"), часто иллюстрируемые соответствующими им примерами.

Недостаточная методическая разработка рекомендательного характера общих принципов технологичности конструкции для ранних стадий концептуаль-

ного проектирования является существенным сдерживающим фактором повышения качества выпускаемых изделий.

### 1. Сборочная технологичность конструкции изделий

Дальнейшее развитие общей методологии интегрированного проектирования (англ. *Concurrent Engineering*) привело к разработке ряда частных методов в аспекте достижения определенных проектных требований (англ. *Design for X*), в частности сборочной технологичности конструкции (англ. *Design for Assembly*). Основой методологии Design for Assembly (DFA) является утверждение, что сокращение в изделии числа составляющих его деталей ведет к созданию конструкции более совершенной с точки зрения производственных затрат, времени изготовления, а также ее качества. Идеальное, с точки зрения сборки, изделие состоит из наименьшего числа компонентов, что служит предпосылкой для сокращения времени сборки, лучшего качества, а также меньшей вероятности того, что изделие будет неправильно собрано [3, 4].

Анализ конструкций с помощью методологии DFA основан на исследовании каждой детали с точки зрения ее необходимости для обеспечения функционирования всего изделия [6]. Все остальные детали, по крайней мере теоретически, могут быть исключены или же объединены с необходимыми деталями. Мерой эффективности процесса сборки и степени сложности конструкции является так называемый показатель DFA:

$$k_{DFA} = \frac{tN}{T} 100 \%,$$

где  $t$  – идеальное время сборки одной детали (например, для ручной сборки – 3 с на деталь);  $N$  – теоретически минимальное число деталей, обеспечивающих правильное функционирование собранного изделия;  $T$  – суммарное прогнозируемое время сборки.

Величина этого показателя для данного конкретного изделия может улучшиться только в результате ликвидации ненужных деталей, операций и сокращения трудоемкости сборки. Этот показатель представ-



ляет собой качественную оценку конструкции изделия с точки зрения эффективности сборочного процесса.

В связи с возрастающими экологическими требованиями к продукции важное значение при проектировании приобретает учет последующих стадий жизненного цикла изделия (ликвидации и рециклинга), в частности удобства его разборки.

При расчете и анализе эксплуатационной технологичности конструкции (надежности машин) технические объекты в зависимости от предусмотренной в нормативно-технической документации возможности проведения ремонтов и технического обслуживания можно разделить на два класса: ремонтируемые и неремонтируемые. Большинство машин и их сборочных единиц относят к классу ремонтируемых объектов. *Ремонтопригодность* — свойство изделия, заключающееся в его приспособленности к обнаружению и предупреждению отказов и повреждений, к восстановлению работоспособности и исправности путем проведения технического обслуживания и ремонта. Свойство ремонтпригодности конструктивно характеризует компоновочное решение механической системы (машин, агрегатов, сборочных единиц), а также их доступность и легкосъемность. Мерой оценки технологичности на этой стадии может служить показатель технического обслуживания  $k_{ТО}$ :

$$k_{ТО} = \frac{c_3}{C_{ТО}} 100 \%,$$

где  $c_3$  — стоимость элемента или операции, которая является целью обслуживания;  $C_{ТО}$  — суммарные затраты на проведение технического обслуживания.

Величина этого показателя для данного изделия может улучшиться только в результате ликвидации ненужных деталей, операций и сокращения трудоемкости разборки. Этот показатель является качественной оценкой конструкции изделия с точки зрения эффективности процесса разборки на стадии технического обслуживания.

Под понятием разборки подразумевается последовательность технологических операций разделения изделия на составляющие его компоненты. Целью этих операций является получение доступа к требуемым деталям и узлам при техническом обслуживании изделия или извлечения наиболее ценных из них при его утилизации, что вынуждает к проведению уже на ранней стадии проектирования глубокого анализа возможностей разделения проектируемого изделия на составляющие его элементы в будущем. Разборка в связи с последующим рециклингом является эффективным средством повторного использования деталей или материалов из утилизированных изделий, приводящим впоследствии к экономии использования ма-



Рис. 1. Критерии селекции (группирования)

териалов и снижению затрат при производстве новых изделий. Очередность разборки и последующей селекции (группирования) деталей обусловлены принятыми критериями, главные из которых показаны на рис. 1.

В изделии, предназначенном для разборки, можно выделить три группы составляющих его элементов:

- одноразового использования, которые во время разборки подвержены разрушениям и могут быть предназначены только для рециклинга материалов;
- многократного использования, которые из-за простоты своей конструкции не проходят верификацию и почти все могут быть повторно использованы в новых изделиях;
- повышенной конструкторской сложности, проходящие верификацию, после которой часть из них может быть повторно использована в новых изделиях после их восстановления.

Рекомендуется, чтобы наиболее ценные, а также вредные для окружающей среды компоненты извлекались из изделия с минимальными затратами на разборку. Остальная оставшаяся часть деталей изделия направлялась бы без разборки на рециклинг материалов. Оптимальную глубину разборки можно определить из анализа диаграмм Парето [4, 5, 6].

Большинство существующих изделий не проектируется с мыслью об удобстве разборки, что является причиной того, что разборка часто становится экономически невыгодной.

Во-первых, структура изделия оптимизирована на основе функциональных требований, что вызывает появление большого числа ненужных переходов и операций при его разборке. Во-вторых, методы соединений выбираются с учетом простоты сборки и надежности соединений, что проявляется в частом применении неразъемных соединений и затрудненном доступе к соединительным элементам. В-третьих, выбор материалов с экономической точки зрения и с учетом оптимального формообразования конструкции часто приводит к применению разнородных



материалов, не поддающихся рециклингу или к высоким затратам на разборку и селекцию (группирование) деталей. Кроме того, изменения при ремонтах и износе во время использования изделия вызывают значительные трудности при разборке сопряженных деталей.

## 2. Концепция САПР сборочной технологичности конструкции изделий

На рис. 2 предложена блок-схема автоматизированного проектирования на основе методологии технологического конструирования DFMA (англ. *Design for Manufacture and Assembly*), базирующейся на трех составляющих методиках:

- проектирование с точки зрения сборки DFA;
- проектирование с точки зрения обработки DFM (англ. *Design for Manufacture*);
- проектирование с точки зрения конкурентоспособности DFC (англ. *Design for Competitiveness*).

Концепция рассматриваемой САПР сводится в своей сути к упрощению конструкции изделия исходя из структуры его технологического процесса сборки.

Проведенные фирмой Motorola [6] исследования связи между качеством изделия и упрощением его конструкции наглядно показывают улучшение уровня качества после внедрения метода DFA. График на рис. 3 иллюстрирует зависимость между сокращением числа составляющих деталей, выраженным через показатель DFA и уровнем качества, измеряемого числом бракованных изделий на 1 000 000 шт. Каждая точка на графике представляет определенное изделие фирмы Motorola. Установлено, что при величине показателя DFA меньше 20 % предполагаемый процесс сборки проектируемого изделия следует считать неэффективным и перейти к анализу следующего варианта данного изделия.

Пакет программного обеспечения комплектуют по типу экспертной системы, он состоит из нескольких модулей для расчета производственных затрат при сборке, различных видах обработки, а также может быть расширен путем добавления аналитическо-расчетных модулей для более поздних фаз жизненного цикла изделия – разборки и рециклинга.

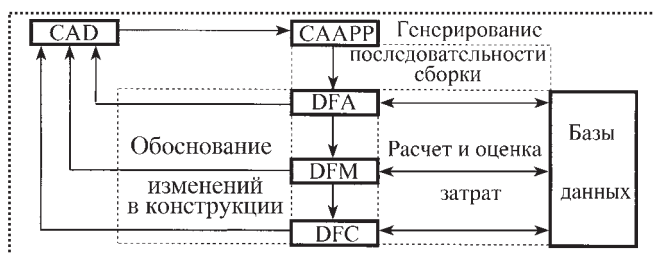


Рис. 2. Концепция САПР на основе методологии технологического конструирования DFMA

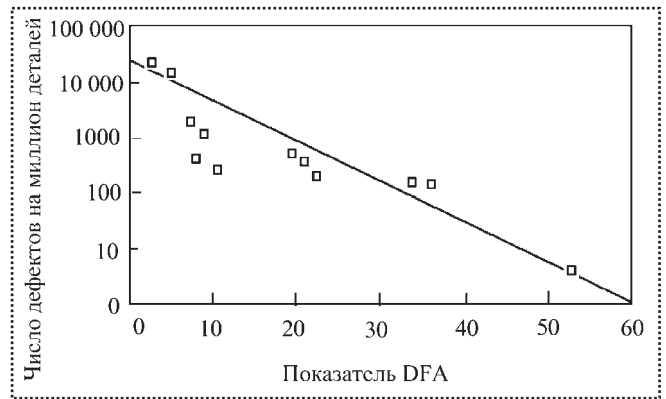


Рис. 3. Влияние числа составляющих деталей на повышение качества изделий фирмы Motorola

В модуле CAD (англ. *Computer Aided Design*) используют программное обеспечение твердотельного параметрического моделирования. Модуль автоматизированного проектирования процессов сборки СААРР (англ. *Computer Aided Assembly Process Planning*) на основе модели составляющих элементов собираемого изделия, находящихся в модуле CAD, генерирует очередность сборки. Далее это же изделие поддается анализу DFA и возможные предложения по изменению конструкции составляющих элементов сразу же учитываются. Генерированное этим способом и правильное с точки зрения сборки изделие далее поддается анализу DFM, а возможные конструкторские изменения вводятся в модуль CAD. Анализ DFM дает возможность оценки затрат, которые учитывают процесс изготовления и применяемые материалы [6]. Альтернативные проекты разрабатываемого изделия, сгенерированные во время анализов DFA и DFM, далее с помощью модуля DFC сравнивают между собой, а также с данными конкурентных изделий. Для анализа используют базы данных, состав которых может изменяться в зависимости от требований проектировщика. Содержащаяся в них информация касается технологичности конструкции при сборке различных вариантов изделия, производственных затрат на изготовление и конкурентоспособности выбранных вариантов изделия по отношению к подобным изделиям, существующих на рынке. Как следствие системного видения конструкции, группа проектировщиков может упростить изделие, изменить вид применяемых конструкционных материалов, упростить структуру и очередность сборки, упростить технологию обработки и т.д.

В методологии DFMA реализуется широко понимаемая идея постоянного, непрерывного совершенствования (яп. *kaizen*, англ. *continuous improvement*), которая находит все большее признание в мире, так как совершенствование технологичности конструкции производимых изделий является одним из основных факторов повышения конкурентоспособности





предприятия. В более широком понимании это основывается на модернизации (англ. *reengineering*) предприятия, в целях повышения эффективности его функционирования, в более узком – на перепроектировании изделия (англ. *redesign*).

Перепроектирование изделия может быть вызвано в одинаковой степени маркетинговыми, технологическими или конструкторскими причинами. В области маркетинга это связано с расширением ассортимента данного изделия для лучшего удовлетворения требований потребителя и ведет к созданию семейства модульных и сегментных конструкций. В сфере технологии – с увеличением серийности продукции в целях сокращения переменных затрат, что связано с процессами унификации, стандартизации и нормализации, создавая условия для применения, в частности, групповой технологии. В сфере конструирования перепроектирование может быть направлено на исправление более или менее существенных конструкторских недочетов, незамеченных ранее, и служит обеспечению оптимального и стабильного качества, или может быть нацелено на адаптацию конструкции к новым потребительским требованиям.

### 3. Моделирование сборочной технологичности конструкции изделий

Возможности автоматизированных методов совершенствования технологичности конструкции рассмотрим на примере перепроектирования опорного ролика (рис. 4) в соответствии с блок-схемой на рис. 2. В модуле CAD использовано программное обеспечение твердотельного параметрического моделирования *Solid Works 2009*, в остальных модулях – пакет программного обеспечения DFMA фирмы Boothroyd Dewhurst Inc. Анализ был проведен для наиболее распространенного типа конструкции опорного ролика (диаметр колеса  $D = 32$  мм), находящего широкое применение в прецизионных устройствах и механизмах, в частности в ременных передачах малой мощности. Маркетинговые исследования рыночных потребностей в этом типе изделия и внутренние производственные возможности определили программу его изготовления в течение 5 лет в количестве 100 000 в год. После анализа технологических возможностей установлено, что партия (серийность продукции) составляющих изделие деталей, отвечающая производственным требованиям, должна составлять 10 000. Из множества вариантов конструкций, существующих на рынке, за основу проектирования были приняты две концепции решения, изображенные на рис. 4, *а* и *б*.

Конструкция на рис. 4, *а* состоит из четырех деталей (корпус, ось, колесо, стопорное кольцо) и имеет показатель DFA = 22,6 %. Конструкция на рис. 4, *б* имеет гладкую симметричную ось,

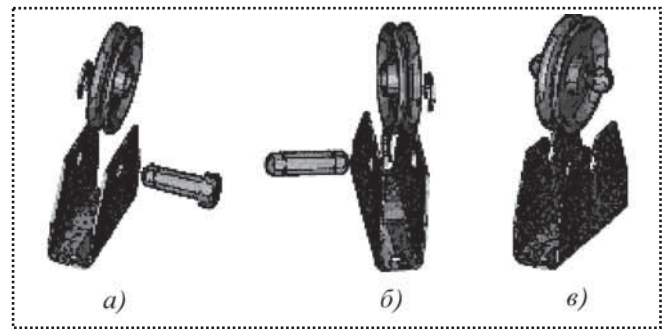


Рис. 4. Существующие (*а, б*) и новая (*в*) конструкция опорного ролика

более дешевую в изготовлении на 0,04 у.е., однако содержит большее количество составляющих деталей из-за необходимости наличия двух стопорных колец. Показатель DFA для этого опорного ролика имеет меньшее значение и составляет 17,2 %. В обоих случаях сборка связана с некоторыми трудностями, поскольку требует ориентировки корпуса и колеса относительно определяющей оси. Для насадки стопорных колец в процессе сборки требуется дополнительная трудоемкая операция изменения положения сборочной единицы. Теоретически минимальное число деталей, рассчитанное программой, составляет 2.

На основе анализа предыдущих конструкций была разработана новая конструкция, изображенная на рис. 4, *в*. Из практики эксплуатации подобных изделий известно, что в 90 % опорных роликов этого типа реакция силы ремня направлена в сторону крепления корпуса, поэтому предложено соединение типа "пружинного замка", использующее упругие свойства корпуса из листового металла. Новая конструкция состоит из трех деталей, создающих возможности для более эффективной сборки, что находит отражение в росте показателя DFA, составляющего в этом случае 51 %. Итоговые результаты анализа DFMA рассматриваемых конструкций приведены в таблице.

Из сравнения данных наглядно видно влияние основного принципа методологии – сокращение числа

#### Оценка конкурентоспособности конструкций опорного ролика

Концепция решения	Рисунок			Идеальное решение
	3, <i>а</i>	3, <i>б</i>	3, <i>в</i>	
Число деталей	4	5	3	2
Показатель DFA, %	22,6	17,2	51	100
Затраты на сборку, у.е.	0,43	0,57	0,19	0
Полные производственные затраты, у.е.	2,27	2,44	1,93	0

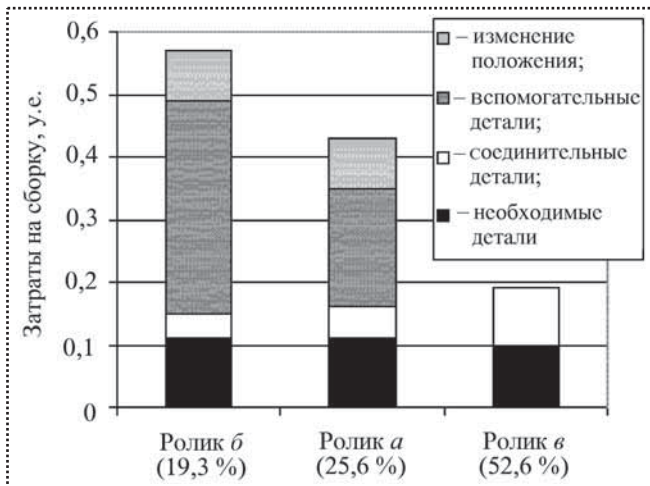


Рис. 5. Затраты на сборку для различных вариантов конструкции опорного ролика

составляющих деталей – на улучшение основных показателей конкурентоспособности изделия.

На рис. 5 представлено сравнение затрат на сборку рассматриваемых опорных роликов с выделением генерируемых программой частных показателей. В скобках для каждого варианта указаны процентные составляющие затрат на сборку необходимых деталей в общих затратах на сборку. Затраты на сборку соединительных и вспомогательных деталей, а также связанные с необходимостью изменения положения компонентов в процессе сборки являются нецелевыми, избыточными затратами, поскольку теоретически могут быть ликвидированы путем перепроектирования конструкции [4, 6].

Интересную информацию дает также сравнение стоимости внутрисистемных рабочих функций

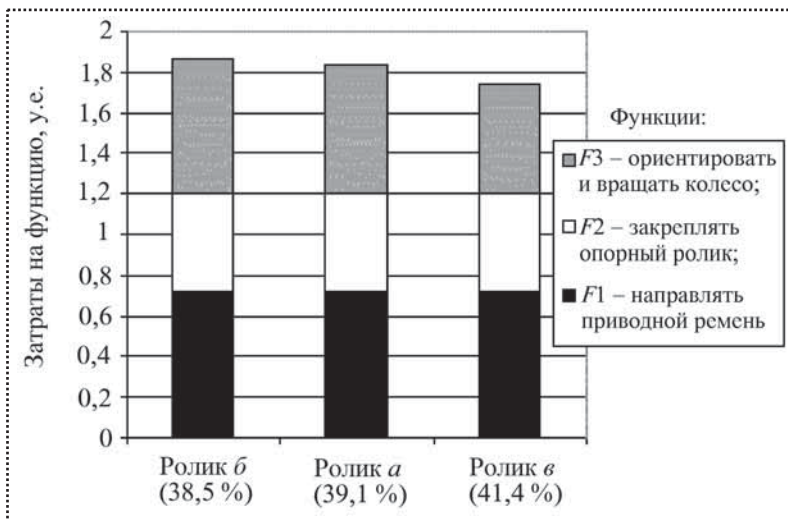


Рис. 6. Функциональные затраты для различных вариантов конструкции опорного ролика

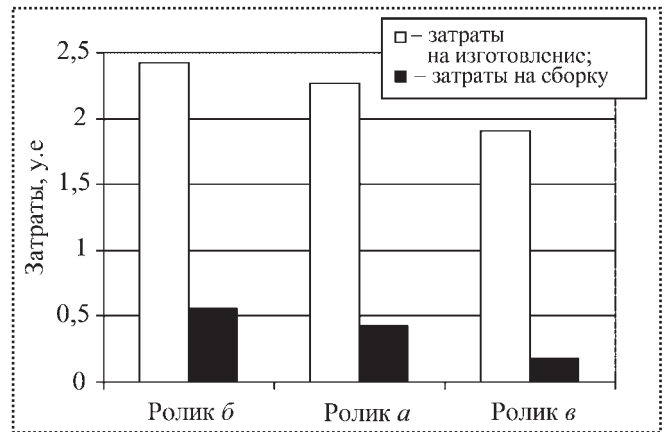


Рис. 7. Сравнительный анализ затрат для различных вариантов конструкции опорного ролика

(рис. 6). Рядом с обозначением варианта решения приводится процентное отношение составляющих затрат главной функции *F1* "направлять приводной ремень" в общих функциональных затратах. Интеграция деталей приводит к снижению затрат ненужной по своему существу функции *F3* "ориентировать и вращать колесо", выполняемую в наилучшем конструкторском решении исключительно самой осью, а в наихудшем – осью и двумя стопорными кольцами. Стоимости остальных функций: *F1*, исполняемую колесом, и *F2* – "закреплять опорный ролик", исполняемую корпусом, для всех конструкций одинаковы. Дальнейшего снижения затрат, вероятнее всего, можно было бы достичь интегрируя функцию *F3* с другой функцией путем объединения носителей этих функций, например, оси с корпусом или оси с колесом. Этим способом можно было бы сократить число составляющих деталей до теоретически минимального числа (двух деталей), рассчитанных программой.

Сравнение производственных затрат на изготовление и затрат полной сборки (разборки) трех конструкций опорного ролика изображено на рис. 7 и также показывает преимущество новой конструкции.

Элементом, который чаще всего требует замены в опорном ролике всех конструкций, является быстроизнашивающееся колесо из пластмассы одинаковой стоимости 0,72 у.е. Стоимость замены для различных конструкторских решений составляет соответственно 0,76, 1,02 и 0,18 у.е. Отсюда показатель технического обслуживания принимает следующие значения:

$$\text{ролик } a: k_{\text{ТО}} = \frac{0,72}{0,76+0,72} 100 \% = 48,6 \%;$$

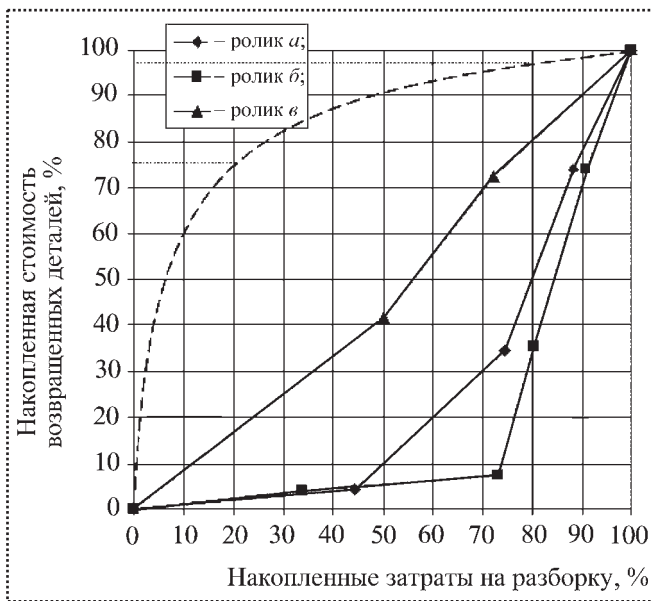


Рис. 8. Диаграммы Парето для различных вариантов конструкции опорного ролика

$$\text{ролик б: } k_{\text{ТО}} = \frac{0,72}{1,02 + 0,72} 100 \% = 41,3 \%;$$

$$\text{ролик в: } k_{\text{ТО}} = \frac{0,72}{0,26 + 0,72} 100 \% = 73,4 \%.$$

Как видно из сравнения значений этого показателя, наилучшим техническим решением опорного ролика и в этом случае остается новая конструкция изображенная на рис. 3, в.

Результаты анализа затрат на разборку и стоимости извлекаемых для повторного использования деталей для различных вариантов конструкции опорного ролика отражены в виде диаграмм Парето (рис. 8). Анализ диаграмм Парето позволяет определить целесообразную глубину разборки с точки зрения возможности повторного использования извлекаемых деталей. За "возвращенную стоимость" принята стоимость изготовления новой детали. Из анализа диаграмм Парето следует, что ни один из вариантов конструкции не удовлетворяет приведенным требованиям (см. рис. 1) целесообразности повторного использования деталей. Только в случае последнего конструкторского решения около 70 % суммарной стоимости возможных для повторного использования деталей достигается затратами не менее 75 % суммарных затрат на разборку; для остальных же вариантов – затратами почти 90 %. С другой стороны, даже при 75 % суммарных затрат на разборку накопленная стоимость извлеченных деталей для двух первых конструкторских решений даже не достигает 40 % и составляет соответственно 34 и 8 %.

Методология DFMA считается, по мнению многих авторов, важнейшей составляющей одновременного интегрированного проектирования. Эффективность DFMA заключается в возможности анализа технологичности конструкции уже на ранних стадиях проектирования, до того, как определены затраты на производство изделия. Как показывают результаты практического применения, кроме снижения затрат, использование методологии DFMA вносит также значительный вклад в улучшение качества и сокращение времени внедрения изделия на рынок.

Метод DFMA создает возможности для роста творческих и рационализаторских способностей, одновременно обеспечивая проектировщика данными, помогающими достижению лучшего качества и надежности проектируемого изделия. Быстрое выявление лишних элементов, уточнения трудоемкости и себестоимости изделия, в совокупности, приводят к росту конкурентоспособности изделия на рынке.

### Вывод

*Метод DFMA создает возможности для отработки конструкции на сборочную технологичность, быстрого выявления лишних элементов, уточнения трудоемкости и себестоимости изделия, что в совокупности приводит к росту конкурентоспособности изделия на рынке.*

### Библиографический список

1. Бержон В.И., Попов М.Е., Попов А.М. Технологичность конструкций машин: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: издательский центр ДГТУ, 2009. 63 с.
2. Попов М.Е., Попов А.М. Интеграция конструкторского и технологического проектирования на основе концепции Concurrent Engineering // Вестник машиностроения. 1998. № 4. С. 41–45.
3. Попов М.Е., Попов А.М. Разработка и постановка продукции на производство на основе структурирования функции качества // Вестник машиностроения. 2000. № 7. С. 52–58.
4. Попов А.М. Методологические основы интегрированных САПР машиностроительных производств: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: издательский центр ДГТУ, 2005. 114 с.
5. Попов А.М. Технико-экономическое моделирование и оптимизация конструкции машин в интегрированных САПР: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: издательский центр ДГТУ, 2006. 99 с.
6. Справочник по функционально-стоимостному анализу / А.П. Ковалёв, Н.К. Моисеева, В.В. Сосун и др.; под ред. М.Г. Карпунина, Б.И. Майданчика. М.: Финансы и статистика, 1988. 431 с.
7. Энгельке У.Д. Как интегрировать САПР и АСТПП. М.: Машиностроение, 1990. 320 с.

УДК 621.7

А.В. Ланщиков, д-р техн. наук, Е.А. Колганов, инженер  
(Пензенская государственная технологическая академия)

## К вопросу затяжки резьбовых соединений пневматическими поршневыми гайковертами\*

На основании математической модели пневмопривода получена система уравнений, позволяющая учесть процессы, происходящие в пневмоцилиндре и переменное сопротивление со стороны резьбового соединения, возникающее при его затяжке.

Based on a mathematical model of an actuator a system of equations that allows to take into account the processes occurring in the cylinders and a variable resistance on the part of the threaded connection that occurs when it is tightened.

**Ключевые слова:** резьбовое соединение, гайковерт, математическая модель.

**Keywords:** threaded connection, box wrench, the mathematical model.

Поршневые гайковерты нашли применение преимущественно для сборки крупных резьб (свыше М24), причем имеют тип привода, как правило, гидравлический.

В последнее время поршневые гайковерты все чаще используют для средних резьб (М6–М24) и для более эффективного их применения требуется тщательное изучение физики процесса сборки резьб [2].

Процесс затяжки резьбового соединения пневматическим поршневым гайковертом определяется взаимосвязью процессов, происходящих в пневмоцилиндре, и особенностями затягиваемого резьбового соединения.

Математическая модель пневмопривода может представлять собой систему дифференциальных уравнений, описывающих движение исполнительного органа и изменение давлений в полостях исполнительного механизма [1]. Исходя из этого математическая модель пневмопривода должна содержать следующие уравнения:

\* Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта № 14.740.11.0984.

- 1) уравнение движения поршня;
- 2) уравнение изменения давления в полости нагнетания;
- 3) уравнение изменения давления в выхлопной полости.

Расчетная схема привода поршневого гайковерта представлена на рис. 1. В данной схеме преобразование поступательного движения поршня во вращательное движение гайки осуществляется с помощью храпового механизма.

Процессы, происходящие в полости пневмоцилиндра, могут быть описаны системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= p_1 F_1 - p_2 F_2 - p_A (F_1 - F_2) - N(t), \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{k f_1 \sqrt{RT_M}}{F_1 (x + x_{01}) \sqrt{\zeta_1}} \sqrt{p_M^2 - p_1^2} - \frac{k p_1}{x + x_{01}} \frac{dx}{dt}, \\ \frac{dp_2}{dt} &= - \frac{k f_2 \sqrt{RT_M}}{F_2 (S - x - x_{02}) \sqrt{\zeta_2}} \left( \frac{p_2}{p_M} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_2^2 - p_A^2} + \\ &+ \frac{k p_2}{(S - x - x_{02})} \frac{dx}{dt}, \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = 0, \text{ если } x \leq 0, \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = 0 \text{ и } x = S, \text{ если } x \geq S, \end{aligned} \right\} (1)$$

- где  $m$  – масса подвижных частей пневмоцилиндра;  
 $x$  – координата положения поршня;  
 $t$  – время;  
 $p_1$  – давление в бесштоковой полости пневмоцилиндра;  
 $F_1$  – площадь поперечного сечения поршня в бесштоковой полости;  
 $p_2$  – давление в штоковой полости пневмоцилиндра;  
 $F_2$  – площадь поперечного сечения поршня в штоковой полости;  
 $p_A$  – атмосферное давление;  
 $N(t)$  – переменная нагрузка, действующая на поршень;



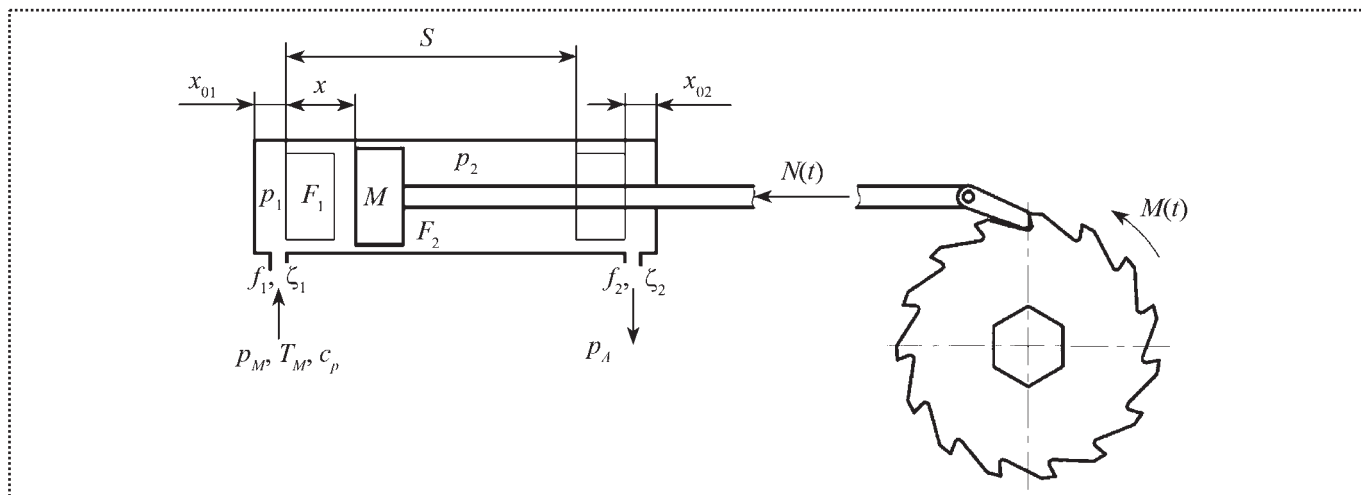


Рис. 1. Расчетная схема пневматического поршневого гайковерта

$k$  – коэффициент,  $k = c_p/c_v$  ( $c_p$  – удельная теплоемкость,  $c_v$  – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме);

$f_1$  – площадь проходного сечения в бесштоковой полости;

$R$  – газовая постоянная;

$p_M$  и  $T_M$  – давление и абсолютная температура на входе в штоковую полость;

$x_{01}$  и  $x_{02}$  – приведенные координаты, характеризующие объем вредного пространства;

$\zeta_1$  – коэффициент сопротивления линии в бесштоковой полости;

$S$  – максимальный ход поршня.

Диаграмма затяжки резьбового соединения гайковертом статического действия представлена на рис. 2.

Известно, что крутящий момент наилучшим образом может учитывать особенности применяемого гайковерта, а угол поворота – особенности резьбы (главным образом податливости). В совокупности данные

характеристики определяют работу затяжки, которая в общем виде может быть выражена формулой

$$A_{\text{зат}} = \int_0^{M_{\text{зат}}} M_{\text{зат}} d\varphi,$$

где  $\varphi$  – угол поворота резьбовой крепежной детали;

$M$  – момент в процессе затяжки резьбового соединения,  $M = M(\varphi)$ .

Несмотря на различный (нелинейный) характер зависимости  $M = f(\varphi)$  для большинства соединений, момент сопротивления вращению, начиная с определенного значения  $\varphi$ , резко возрастает; при этом характер возрастания момента позволяет с достаточной степенью точности рассматривать его как линейную зависимость, т.е. считать, что  $M$  пропорционален  $\varphi$ . В линеаризованном виде зависимость  $M = f(\varphi)$  можно выразить следующим соотношением:

$$M \simeq M^{\text{лин}} = M_{c_0} + g\varphi, \quad (0 \leq \varphi \leq \varphi^*), \quad (2)$$

где  $g$  – коэффициент пропорциональности.

Из выражения (2) следует, что  $dM = g d\varphi$ , значит, возможен переход от угла поворота к моменту затяжки с помощью соотношения  $d\varphi = \frac{dM}{g}$ . В этом случае

пренебрегают частью работы завинчивания, которая совершается при весьма малом моменте  $M_{c_0}$  и поэтому имеет малую величину. Тогда получим:

$$M = g\varphi. \quad (3)$$

В выражении (1) нагрузка на штоке  $N(t)$  прямо пропорциональна крутящему моменту  $M$ :

$$N(t) = M(t)r, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус храпового колеса.

Подставив (4) в (3), получим

$$N(t) = rg\varphi(t). \quad (5)$$

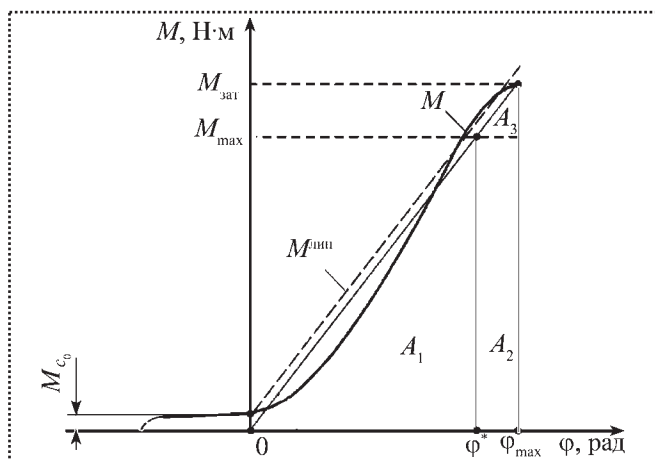


Рис. 2. Зависимость момента от угла поворота при затяжке резьбового соединения пневматическим гайковертом



Подставив (5) в (1), получим

$$\left. \begin{aligned} m \frac{d^2 x}{dt^2} &= p_1 F_1 - p_2 F_2 - p_A (F_1 - F_2) - r g \varphi(t), \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{k f_1 \sqrt{RT_M}}{F_1 (x + x_{01}) \sqrt{\zeta_1}} \sqrt{p_M^2 - p_1^2} - \frac{k p_1}{x + x_{01}} \frac{dx}{dt}, \\ \frac{dp_2}{dt} &= - \frac{k f_2 \sqrt{RT_M}}{F_2 (S - x - x_{02}) \sqrt{\zeta_2}} \left( \frac{p_2}{p_M} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_2^2 - p_A^2} + \\ &+ \frac{k p_2}{(S - x - x_{02})} \frac{dx}{dt}, \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = x = 0, \text{ если } x \leq 0; \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = 0 \text{ и } x = S, \text{ если } x \geq S. \end{aligned} \right\} (6)$$

Таким образом, используя полученную систему уравнений, можно учесть процессы, происходящие в пневмоцилиндре и переменное сопротивление со стороны резьбового соединения, возникающее при его затяжке. При этом полученная система уравнений не учитывает особенностей храпового механизма, преобразующего поступательное движение пневмоцилиндра во вращательное движение, необходимое для завинчивания резьбового соединения.

#### Библиографический список

1. Донской А.С. Обобщенные математические модели элементов пневмосистем: монография / А.С. Донской. СПб.: РИЦ СПГУТД, 2001. С. 213–214.
2. Ланщиков А.В. Обеспечение качества операций сборки резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 11. С. 47–48.



## ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

### ДИАГНОСТИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА



С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин Под редакцией: С.Н. Григорьева  
2011. – 600 с. ISBN 978-5-94275-578-2 **ЦЕНА 600 р.**

Систематизирован теоретический и экспериментальный материал, касающийся вопросов диагностики автоматизированного машиностроительного производства. Структура монографии соответствует предложенному алгоритму, устанавливающему последовательность задач, которые необходимо решать при разработке систем диагностирования режущего инструмента и станка. Таким образом, излагается система знаний о повреждениях в объектах диагностирования, измерениях повреждений, принятии решений по их устранению и управлению процессом.

Для инженерно-технических и научных работников, занимающихся вопросами разработки, исследования и практического применения в автоматизированном производстве различных систем диагностирования, аспирантов, а также для студентов машиностроительных специальностей вузов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:  
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru  
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.717

**М.Н. Сорокин**, д-р техн. наук, профессор, **Ю.Н. Ануров**, инженер  
(Московский государственный вечерний металлургический институт)  
E-mail: ayn2001@mail.ru

## Анализ собираемости изделий типа "вал–втулка" при селективной сборке

*Предложено проводить реализацию селективной сборки изделий типа "вал–втулка" по действительным значениям сопрягаемых параметров. Введено понятие коэффициента устойчивости решения задачи комплектования, что отражает влияние плотностей распределения сопрягаемых параметров на собираемость изделий. Дан качественный анализ факторов, влияющих на полную, устойчивую и бездефектную собираемость изделий при селективной сборке.*

*It is offered to spend realization of selective assembly of products of type "shaft–plug" on the valid values of interfaced parameters. The concept of factor of stability of the decision of a problem of acquisition that reflects influence of density of distribution of interfaced parameters on a collecting of products is entered. The qualitative analysis of the factors influencing a full, steady and faultless collecting of products at selective assembly is given.*

**Ключевые слова:** селективная сборка, селективный интервал, задача комплектования, сопрягаемый параметр, параметр сопряжения, метод межгрупповой взаимозаменяемости, коэффициент устойчивости решения задачи комплектования, полная собираемость изделий, устойчивая собираемость изделий, бездефектная собираемость изделий.

**Keywords:** selective assembly, selective interval, acquisition problem, the interfaced parameter, interface parameter, method of intergroup interchangeability, stability factor solution of a problem of acquisition, full collecting of products, steady collecting of products, faultless collecting of products.

Рассмотрим собираемость изделий типа "вал–втулка" при селективной сборке по методу межгрупповой взаимозаменяемости.

Введем необходимые обозначения в относительной системе полей допусков [1]. Пусть:

$x_i$  – сопрягаемый параметр вала и втулки,  $i = \overline{1, 2}$ ;  
 $\delta x_i$  – поле допуска сопрягаемого параметра  $x_i$ ,  $\delta x_i = [-1, +1]$ ;  
 $f_i(x_i)$  – функция плотности распределения сопрягаемого параметра  $x_i$ ;

$\delta$  – длина селективного интервала поля допуска сопрягаемого параметра вала  $x_1$  и втулки  $x_2$ ;

$R$  – параметр сопряжения,  $R = x_1 - x_2$ ;

$\Delta R$  – допуск на параметр сопряжения;

$\delta R$  – поле допуска параметра сопряжения,

$$\delta R = \left[ -\frac{\Delta R}{2}, \frac{\Delta R}{2} \right];$$

$p$  – собираемость изделий.

Собираемость изделий  $p$  есть функция параметров  $\delta, \Delta R, \delta x_i, f_i(x_i)$ , т.е.  $p = \varphi[\delta, \Delta R, \delta x_i, f_i(x_i)]$ .

Анализ результатов, полученных в работе [1], показывает, что собираемость изделий  $p$  увеличивается с уменьшением длины селективного интервала  $\delta$  сопрягаемых параметров  $x_i$ . Поэтому при практической реализации селективной сборки изделий типа "вал–втулка" необходимо длину селективного интервала  $\delta$  выбирать минимальной. Длину селективного интервала  $\delta$  нужно выбирать равной дискретности последнего разряда числа, определяющего действительное значение сопрягаемого параметра  $x_i$ . Например, если действительное значение сопрягаемого параметра  $x_1 = 0,362$ , то длина селективного интервала  $\delta$  должна быть равна 0,001. При таком выборе длины селективного интервала  $\delta$  сопрягаемого параметра  $x_i$  селективная сборка изделий реализуется фактически по действительным значениям сопрягаемых параметров.

Выбор минимальной длины селективного интервала приводит к увеличению размерности задачи комплектования. Так, для рис. 1 при выборе длины селективного интервала  $\delta = 0,001$  число селективных интервалов возрастает до 2 000, а число допустимых путей комплектования при  $\Delta R = 0,4$  равно 758 200. Возникает проблема "проклятия" размерности при решении задачи комплектования.

Для решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал–втулка" авторами разработан "усеченный" метод северо-западного угла [2], который полностью снимает вычислительные проблемы, связанные с размерностью задачи комплектования.

Так как мы проводим анализ собираемости изделий в относительной системе полей допусков, то

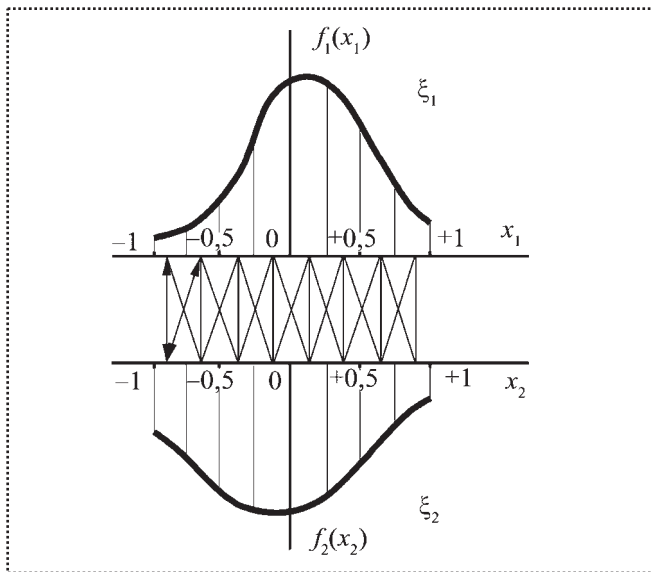


Рис. 1. Метод межгрупповой взаимозаменяемости

влияние фактора  $\delta x_i$  на собираемость изделий исключается. Однако вполне очевидно, что для максимальной собираемости изделий необходимо чтобы  $\delta x_1 = \delta x_2$  вне зависимости от выбора системы полей допусков.

Главным фактором, определяющим собираемость изделий при селективной сборке, являются функции плотностей распределения  $f_i(x_i)$  сопрягаемых параметров  $x_i$ . Величины  $f_i(x_i)$  и  $\delta x_i$  определяются точностью технологического процесса получения сопрягаемых параметров  $x_i$ . Идентичность функций плотностей распределения  $f_i(x_i)$  сопрягаемых параметров  $x_i$  обеспечивает максимальную собираемость изделий.

Если точности технологических процессов получения сопрягаемых параметров  $x_i$  различны, т.е.  $f_1(x_1)$  определена на  $\delta x_1 = [-1, +1]$ , а  $f_2(x_2)$  определена на  $\delta x_2 = [-a, +a]$ ,  $a < 1$ , то необходимо, используя технологический процесс получения сопрягаемого параметра  $x_2$  на отрезке  $\delta x_2 = [-a, +a]$ ,  $a < 1$ , методом композиции получить функцию плотности распределения  $f_2(x_2)$  на отрезке  $\delta x_2 = [-1, +1]$ , наиболее близкую к функции  $f_1(x_1)$  на отрезке  $\delta x_1 = [-1, +1]$ . Однако это является самостоятельной задачей и в данной статье не рассматривается.

Пусть сопрягаемый параметр  $x_i$  является случайной величиной  $\xi_i$  с функцией плотности распределения  $f_i(x_i)$  и эта функция известна.

Рассмотрим пример, где

$$\xi_1 = N(0, \sigma_1^2), 6\sigma_1 = 2,$$

$$\xi_2 = N(0, \sigma_2^2), 3\sigma_2 = 2.$$

Функция плотности распределения  $f_2(x_2)$  определена и нормирована на отрезке  $[-1, +1]$ . Тогда, выби-

рая длину селективного интервала  $\delta = 0,001$  и зная значения функций плотностей распределения  $f_i(x_i)$ , мы можем определить минимальный допуск  $\Delta R_{\min}$  на параметр сопряжения  $\Delta R$ , при котором обеспечивается полная собираемость изделий, т.е.  $p = 1$ . Для данного примера этот минимальный допуск на параметр сопряжения  $\Delta R_{\min} = 0,56$  (см. далее таблицу). Таким образом, только функции плотностей распределения  $f_i(x_i)$  сопрягаемых параметров  $x_i$  определяют собираемость изделий при селективной сборке. Методика определения минимального допуска на параметр сопряжения  $\Delta R_{\min}$  в данной статье не приводится.

Пусть  $\Delta R_T$  – допуск на параметр сопряжения  $R$ , устанавливаемый конструктором или технологом и обеспечивающий полную, устойчивую и бездефектную технологию селективной сборки изделий.

Если  $\Delta R_T < \Delta R_{\min}$ , то собираемость изделий  $p < 1$ .

Если  $\Delta R_T > \Delta R_{\min}$ , то в этом случае обеспечивается полная собираемость изделий  $p = 1$ . Однако возникает вопрос, как могут изменяться функции плотностей распределения  $f_i(x_i)$ , чтобы полная собираемость изделий сохранялась, т.е.  $p = 1$ .

Решением задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал–штука" по методу межгрупповой взаимозаменяемости является собираемость изделий  $p$ . Собираемость изделий  $p$  может удовлетворять следующим условиям:

$$p = 1, \quad (1)$$

$$p < 1. \quad (2)$$

Рассмотрим, сохраняется ли выполнение условия (1) при изменении функций плотностей распределения  $f_i(x_i)$  сопрягаемых параметров  $x_i$ .

Введем понятие устойчивости решения задачи комплектования (рис. 2).

Пусть для параметров  $\delta$ ,  $\Delta R$ ,  $\delta x_i$  и  $f_i(x_i)$  задача комплектования имеет решение  $p = 1$ .

Пусть для функций плотностей распределения  $\tilde{f}_i(x_i)$  задача комплектования имеет решение  $\tilde{p}$ .

Решение задачи комплектования  $p$  назовем устойчивым, если для произвольных сколь угодно малых чисел  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_i > 0$ , найдутся функции плотностей распределения  $\tilde{f}_i(x_i)$  такие, что при выполнении условия

$$\|f_i(x_i) - \tilde{f}_i(x_i)\| < \varepsilon_i,$$

задача комплектования имеет решение  $\tilde{p} = 1$ .

В качестве количественного показателя устойчивости решения задачи комплектования введем коэффициент устойчивости решения задачи комплектования.



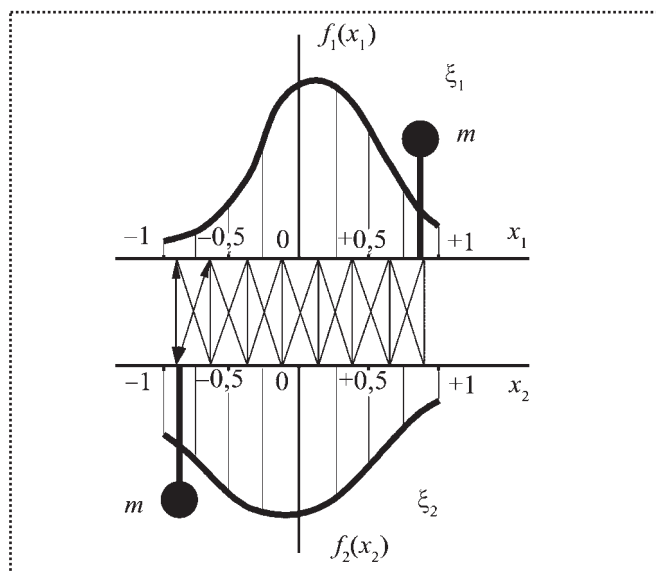


Рис. 2. Устойчивость решения задачи комплектования

Функции плотностей распределения  $\tilde{f}_i(x_i)$  выберем следующим образом:

$$\tilde{f}_i(x_i) = \frac{1}{1+m} [f_i(x_i) + \theta_i(x'_i - x_i)],$$

где

$$\theta_i(x'_i - x_i) = \begin{cases} 1, & x'_i = x_i \\ 0, & x'_i \neq x_i \end{cases}.$$

Точка  $(x'_1, x'_2)$  является фиксированной. Решение задачи комплектования  $\tilde{p}$  для функций плотностей распределения  $\tilde{f}_i(x_i)$  зависит от параметров  $x'_1, x'_2, m$ , т.е.  $\tilde{p} = \tilde{p}(x'_1, x'_2, m)$ .

Для выбранной точки  $(x'_1, x'_2)$  выполнение условия (1) или (2) зависит от величины  $m$ .

Для выбранной точки  $(x'_1, x'_2)$  существует такое максимальное значение  $m = m^*$ , при котором условие (1) выполняется, а при  $m > m^*$  уже выполняется условие (2). Значение  $m^*$  зависит от выбора точки  $(x'_1, x'_2)$ , т.е. является функцией  $m^* = m^*(x'_1, x'_2)$ .

Запасом устойчивости решения задачи комплектования назовем величину  $m_{уст}$ , равную

$$m_{уст} = \min_m \max_{(x'_1, x'_2) \in X} m^*(x'_1, x'_2),$$

где  $\bar{X}$  – множество точек, определяемое полем допуска  $\Delta R$  параметра сопряжения  $R$ , при условии

$$\tilde{p} = \tilde{p}(x'_1, x'_2, m^*) = 1.$$

Коэффициентом устойчивости решения задачи комплектования назовем величину  $k_{уст}$ , равную

$$k_{уст} = \begin{cases} 1 + m_{уст}, & p = 1 \\ p, & p < 1. \end{cases}$$

Точку, в которой достигается запас устойчивости  $m_{уст}$ , назовем точкой максимальной устойчивости и обозначим  $(x_1^*, x_2^*)$ .

Рассмотрим изменение значений  $k_{уст}$  в зависимости от допуска  $\Delta R$  на параметр сопряжения  $R$  для приведенного ранее примера. Точкой максимальной устойчивости для данного примера является точка с координатами  $x_1^* = +1, x_2^* = -1$  (см. рис. 2).

Методика определения  $k_{уст}$  в данной статье не приводится.

В таблице представлены значения собираемости изделий  $p$  и коэффициента устойчивости  $k_{уст}$ .

На рис. 3 для указанного примера приведены графики изменения собираемости изделий  $p$  и коэффициента устойчивости  $k_{уст}$  решения задачи комплектования в зависимости от допуска на параметр сопряжения  $\Delta R$ .

Целью разработки технологии селективной сборки изделий является создание технологического процесса, который обеспечивает полную, устойчивую и бездефектную технологию получения сопряжений.

Рассмотрим периодическую селективную сборку. Детали партиями поступают для комплектования. Скомплектованные детали поступают на сборку. Затем поступает следующая партия деталей. Нескомплектованные детали предыдущей партии добавляются к деталям следующей партии. Снова проводится операция комплектования и т.д. Процесс комплектования при периодической селективной сборке может быть формализован как задача накопления. Партии деталей реализуются в виде выборочных значений случайных величин  $\xi_j$ .

### Собираемость изделий типа "вал-втулка"

Параметр	Допуск на параметр сопряжения $\Delta R$														
	0,002	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	0,56	0,7	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0
$p$	0,750	0,750	0,751	0,758	0,774	0,803	0,855	0,983	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
$k_{уст}$	0,750	0,750	0,751	0,758	0,774	0,803	0,855	0,983	1,000	1,022	1,065	1,114	1,225	1,325	1,500

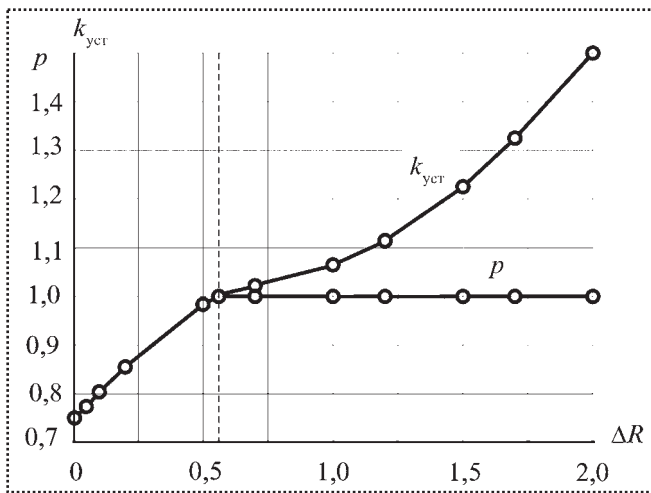


Рис. 3. Графики собираемости изделий типа "вал–втулка"

Пусть случайная величина  $\zeta$  определяет накопленный остаток в задаче накопления. Величина  $\zeta$  характеризует остаток нескомплектованных деталей в процессе комплектования во времени. Если  $M\{\zeta\}$  не является возрастающей функцией во времени, то процесс комплектования является устойчивым. Если  $M\{\zeta\}$  — возрастающая функция во времени, то процесс комплектования является неустойчивым. Стабильность технологического процесса получения сопрягаемых параметров, т.е. стабильность получения плотностей распределения  $f_i(x_i)$  сопрягаемых параметров  $x_i$  определяет устойчивость процесса комплектования. Чтобы скомпенсировать возможные изменения функций плотностей распределения  $f_i(x_i)$ , необходимо расширить минимальный допуск  $\Delta R_{min}$  на параметр сопряжения  $R$  на величину  $\Delta R_1$ , т.е.

$$\Delta R_T = \Delta R_{min} + \Delta R_1,$$

где  $\Delta R_1$  — увеличение допуска  $\Delta R_{min}$  для компенсации изменения функций  $f_i(x_i)$ .

Определение фактического значения  $\Delta R_1$  в данной статье не приводится.

Обеспечение полной собираемости в процессе комплектования требует, чтобы вероятность получения остатка  $P\{\zeta > 0\}$  была минимальной.

Для обеспечения этого требования необходимо также расширение допуска  $\Delta R_{min}$  на величину  $\Delta R_2$ , т.е.

$$\Delta R_T = \Delta R_{min} + \Delta R_1 + \Delta R_2.$$

Значение  $\Delta R_2$  определяется путем математического моделирования процесса накопления.

Известно, что при селективной сборке изделий из-за погрешностей измерения сопрягаемых параметров и параметра сопряжения могут получаться бракованные сопряжения. Поэтому для получения бездефектной технологии селективной сборки необходимо также расширение минимального допуска  $\Delta R_{min}$  на параметр сопряжения  $R$  на величину  $\Delta R_3$ , которая скомпенсирует погрешности измерения параметров, т.е.

$$\Delta R_T = \Delta R_{min} + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3.$$

Определение вероятности получения бракованных сопряжений и величины  $\Delta R_3$  для предложенного метода селективной сборки в данной статье не приводится.

### Выводы

1. Предложено проводить реализацию селективной сборки изделий типа "вал–втулка" по действительным значениям сопрягаемых параметров. Селективный интервал следует выбирать минимальным и равным дискретности последнего разряда числа, определяющего действительное значение сопрягаемого параметра  $x_i$ .

2. Введено понятие коэффициента устойчивости  $k_{уст}$  решения задачи комплектования. Коэффициент устойчивости  $k_{уст}$  решения задачи комплектования отражает влияние изменений функций плотностей распределения  $f_i(x_i)$  сопрягаемых параметров  $x_i$  на собираемость изделий  $p$ .

3. Существует минимальный допуск  $\Delta R_{min}$  на параметр сопряжения  $R$  для функций плотностей распределения  $f_i(x_i)$  сопрягаемых параметров  $x_i$ , при котором обеспечивается полная собираемость изделий.

4. Полная, устойчивая и бездефектная собираемость изделий может быть достигнута при определенном допуске  $\Delta R_T$ , устанавливаемом конструктором или технологом,  $\Delta R_T > \Delta R_{min}$ .

### Библиографический список

1. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Формализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 8. С. 75–82.

2. Сорокин М.Н. Метод решения транспортной задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал–втулка". Математическое обеспечение и программирование для вычислительных и управляющих систем: межвузовский сборник научных трудов. М.: МИЭМ, 1983. С. 18–24.

УДК 621.757.05-52

**Л.Б. Черняховская**, канд. физ.-мат. наук (Самарский государственный технический университет),  
**Д.А. Симаков**, инженер (Институт гравитационной физики общества Макса Планка  
 (институт имени Альберта Эйнштейна), Ганновер, Германия)  
 E-mail: lucher@list.ru, Dmitry simakov@aei.de

## Кинематика и динамика процесса сборки цилиндрических деталей

Рассмотрена кинематика и динамика движения вала, опирающегося на три точки кромки отверстия втулки, в процессе совмещения цилиндрических деталей. Установлены основные закономерности этого движения, представлена методика расчета траекторий и скоростей. Определены силы, действующие на вал в точках контакта, составлены дифференциальные уравнения движения вала в процессе совмещения, позволяющие анализировать надежность и качество способов сборки и реализующих их устройств.

The article deals with kinematics and dynamics of the motion of shaft bearing on the points of the bush hole-edge in the process of cylindrical details matching. This motion's rules are established, the method of calculation of trajectories and velocities methods is presented. The forces influencing the shaft in three points of contact are fined. Shaft motion differential equations are determined. It allows to analyze reliability and quality of assembly and its devices.

**Ключевые слова:** цилиндрические детали, автоматическая сборка, три точки контакта, траектория, скорость, дифференциальное уравнение.

**Keywords:** cylindrical parts, the automated assembly, three points of contact, trajectory, velocity, differential equation.

Качество и надежность автоматической сборки определяются соответствием движения, сообщаемого сборочным устройством, закономерностям относительного движения деталей, обусловленного особенностями контакта, полученного в процессе предварительного ориентирования вала и втулки на позиции сборки.

В том случае, когда зазор между сопрягаемыми поверхностями мал, вал устанавливается на кромку отверстия втулки под довольно большим углом, значение которого  $\gamma = \arccos d/D$  ( $d$  – диаметр вала,  $D$  – диаметр отверстия втулки). В этом случае вал опирается на три точки кромки отверстия втулки (рис. 1),

одна из которых, точка  $K$ , располагается в плоскости симметрии деталей между образующей вала и кромкой отверстия втулки, а две другие точки –  $B_1$  и  $B_2$  – между кромками обеих деталей симметрично плоскости, проходящей через оси деталей. В процессе совмещения угол наклона между деталями  $\gamma$  уменьшается, симметричные точки контакта сближаются и при  $\gamma = \arccos d/D$  сливаются в одну. Дальнейшее движение деталей происходит при значениях  $\gamma < \arccos d/D$  и протекает в условиях контакта в двух точках. Закономерности этого движения детально исследованы и опубликованы в работах, посвященных автоматической сборке цилиндрических деталей.

При проведении анализа движения вала, опирающегося в процессе совмещения на три точки кромки отверстия втулки, будем считать вал и втулку абсолютно твердыми телами правильной геометрической формы, а контакт между их поверхностями – точечным. Детали имеют гарантированный зазор  $\delta = D - d$ .

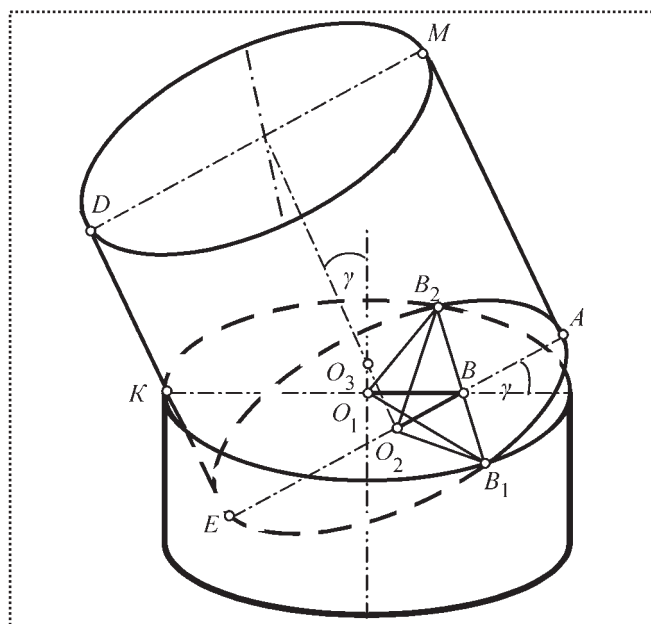


Рис. 1. Положение вала, опирающегося на три точки кромки отверстия втулки

## 1. Кинематический анализ

В общем случае вал, сохраняя в трех точках контакт с кромкой отверстия втулки, может совершать три независимых друг от друга движения: вращение вокруг собственной оси, вращение вокруг оси втулки и плоскопараллельное движение, характеризующее движением сечения вала  $AMDE$  в плоскости симметрии деталей. В первых двух случаях угол между осями деталей не меняется, расстояния между точками контакта остаются постоянными, и совмещение деталей не происходит. Уменьшение угла между осями деталей происходит при плоскопараллельном движении вала, следовательно, именно это движение является движением, обеспечивающим совмещение деталей. Закономерности этого движения определяются расположением точек контакта.

Положение симметричных точек контакта на каждой из совмещаемых деталей определяется расстояниями  $S_1 = O_1B$  и  $S_2 = O_2B$  отрезка  $B_1B_2$ , соединяющего симметричные точки контакта, до центров  $O_1$  и  $O_2$  совмещаемых кромок втулки и вала [2].

Из совместного рассмотрения треугольников  $O_1BB_1$ ,  $O_2BB_1$  и  $BKE$  получаем:

$$S_1 = O_1B = \frac{D(1 + \cos^2 \gamma) - 2d \cos \gamma}{2 \sin^2 \gamma},$$

$$S_2 = O_2B = \frac{d(1 + \cos^2 \gamma) - 2D \cos \gamma}{2 \sin^2 \gamma}.$$

Расстояния  $S_1$  и  $S_2$ , однозначно определяемые углом  $\gamma$ , увеличиваются с его уменьшением, и при  $\gamma =$

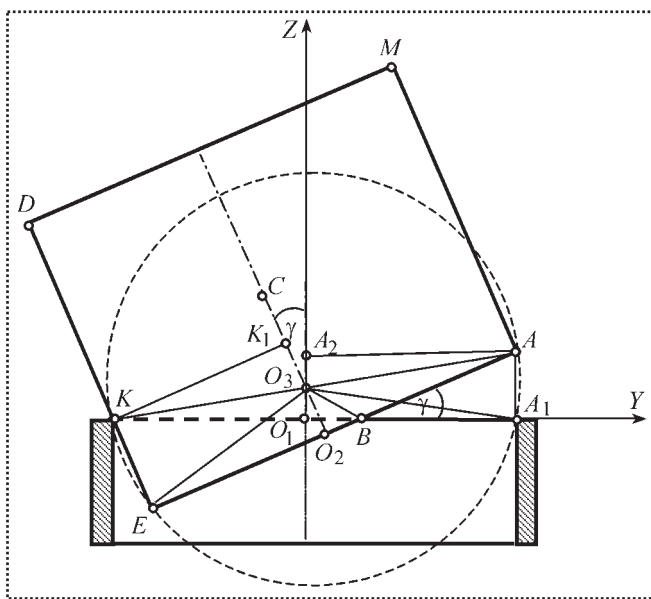


Рис. 2. Геометрические параметры процесса совмещения

$= \arccos d/D$  становятся равными:  $S_1 = D/2$ ,  $S_2 = d/2$ , т.е. симметричные точки контакта сливаются в одну и дальнейшее движение вала происходит при контакте с поверхностью втулки в двух точках.

Полученные значения  $S_1$  и  $S_2$  позволяют определить положение всех точек вала, расположенных в плоскости сечения  $AMDE$ , являющегося основной плоскостью плоскопараллельного движения (рис. 2). Величина погружения вала внутрь втулки характеризуется отрезком  $KE$ , значение которого определяется из треугольника  $KBE$ :

$$KE = KB \sin \gamma = \left( \frac{D}{2} + S_1 \right) \sin \gamma = \frac{D - d \cos \gamma}{\sin \gamma}.$$

Положение точки  $A$ , находящейся на конце диаметра нависающей части кромки вала, определяется координатами:

$$y_A = O_1B + BA \cos \gamma = S_1 + \left( \frac{d}{2} - S_2 \right) \cos \gamma = \frac{D}{2};$$

$$z_A = AA_1 = AB \sin \gamma = \left( \frac{d}{2} - S_2 \right) \sin \gamma = \frac{d - D \cos \gamma}{\sin \gamma}.$$

Отсюда следует, что координата  $y_A$  в процессе движения остается постоянной, следовательно, точка  $A$  движется по прямой  $AA_1$ , являющейся продолжением находящейся в плоскости симметрии образующей внутренней поверхности втулки. После совмещения кромок точка  $A$  плавно переходит на внутреннюю поверхность втулки.

Координаты центра масс  $C$  вала равны (см. рис. 2):

$$y_C = (O_2C - O_2O_3) \sin \gamma,$$

$$z_C = O_2C \cos \gamma - O_2B \sin \gamma = \frac{H}{2} \cos \gamma - S_2 \sin \gamma,$$

где  $O_3$  – точка пересечения осей вала и втулки;  $H$  – высота вала.

Точка  $O_3$  пересечения осей вала и втулки находится на одинаковом расстоянии от точек  $A_1$  и  $K$ , лежащих на кромке отверстия втулки в плоскости симметрии, и от точек  $E$  и  $A$  кромки вала, и является центром окружности, проходящей через точки  $K$ ,  $E$ ,  $A$  и  $A_1$ , следовательно,  $O_3A = O_3A_1 = O_3K = O_3E$ , а точка  $O_3$  делит отрезки  $O_1A_2$  и  $O_2K_1$  пополам. Тогда  $O_2O_3 = \frac{D - d \cos \gamma}{2 \sin \gamma}$ .

$$\text{Следовательно, } y_C = \frac{H}{2} \sin \gamma - \frac{D - d \cos \gamma}{2},$$

$$z_C = \frac{H}{2} \cos \gamma - S_2 \sin \gamma.$$



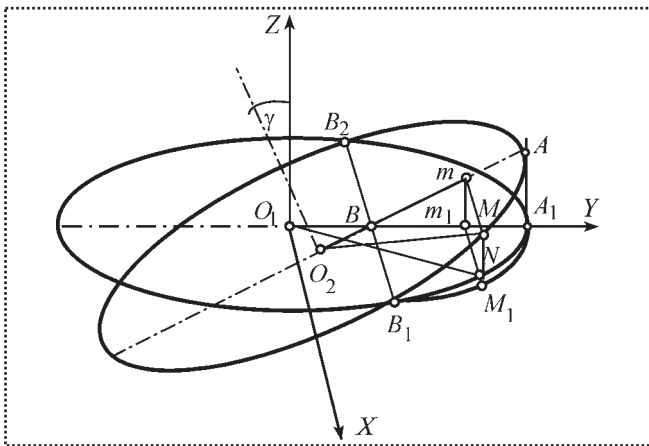


Рис. 3. Относительное расположение совмещаемых кромок при контакте деталей в трех точках

Координаты точки  $M$  вала равны:

$$y_M = \frac{D}{2} - H \sin \gamma,$$

$$z_M = H \cos \gamma + AA_1 = H \cos \gamma + \frac{d - D \cos \gamma}{\sin \gamma}.$$

Траектория точки  $M$ , построенная в соответствии с этими уравнениями, имеет точку перегиба, положение которой зависит от угла  $\gamma$ . Так для деталей с параметрами  $d = 49,9$  мм,  $D = 50$  мм,  $H = 70$  мм наивысшая точка соответствует углу  $\gamma = 0,38$  рад =  $21,77^\circ$ , что необходимо учитывать при сборке деталей.

Полученные результаты позволяют уточнить область нависания кромки вала над кромкой отверстия втулки. Проекция кромки нижнего торца вала на плоскость отверстия втулки представляет собой эллипс (рис. 3), имеющий с кромкой отверстия втулки три общие точки: точку  $A_1$ , являющуюся проекцией наивысшей точки  $A$  кромки вала, и симметричные точки контакта  $B_1, B_2$ .

Величина нависания  $\Delta x = x_M - x_N$  может быть представлена как разность абсцисс двух точек, расположенных в одной вертикальной плоскости: точки  $M$ , принадлежащей нависающей части кромки вала, и точки  $N$ , находящейся на окружности кромки отверстия втулки:

$$\Delta x = \sqrt{\frac{D^2}{4} - (S_1 + BM \cos \gamma)^2} - \sqrt{\frac{d^2}{4} - (S_2 + Bm)^2}.$$

Если точку  $N$  выбрать в середине дуги  $BA$  окружности кромки втулки, то  $Bm = 0,5AB = 0,5\left(\frac{d}{2} - S_2\right)$ . Гра-

фики, построенные в соответствии с полученными формулами, позволили установить, что максимальная величина нависания кромки вала над отверстием втулки сравнима с величиной гарантированного зазора и уменьшается с уменьшением угла между осями

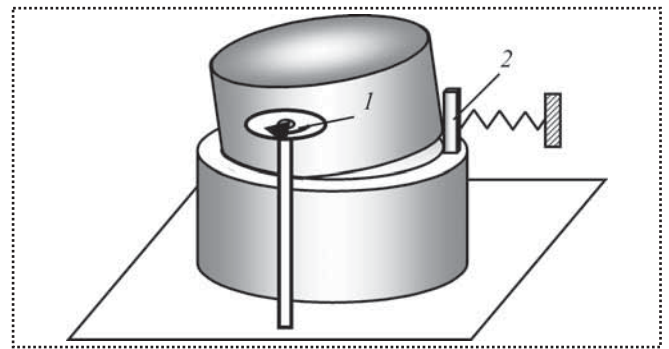


Рис. 4. Устройство для вертикальной сборки цилиндрических деталей

деталей. Таким образом, кромка нижнего торца вала нависает над отверстием втулки на участках, расположенных между симметричными точками контакта деталей  $B_1$  и  $B_2$ , и точкой  $A_1$ , в то время как в точке  $A_1$  нависание отсутствует, т.е. зонами возможного заклинивания деталей являются участки  $B_2A_1$  и  $B_1A_1$ .

Установленные закономерности движения вала реализуются в способах сборки цилиндрических деталей с гарантированным зазором. Устройство (а.с. № 1668090 МКИ В23Р 19/04) предназначено для вертикальной схемы сборки, в котором для углов  $\gamma = \arccos d/D$  движение вала обеспечивает вращающий момент, создаваемый при помощи двух вращающихся в противоположные стороны эксцентриков  $1$  (рис. 4). Действие вращающего момента может привести к отрыву вала от кромки втулки в точке  $K$  (см. рис. 2). В этом случае вал будет опираться только на две симметричные точки кромки втулки, и совмещение деталей станет невозможным. Для того чтобы исключить подобную ситуацию, в устройстве предусмотрен вертикальный упор  $2$  (см. рис. 4), расположенный перпендикулярно плоскости симметрии деталей, рабочая плоскость которого проходит через образующую внутренней поверхности втулки. Такое расположение рабочей плоскости соответствует характерному движению точки  $A$  кромки вала (см. рис. 3). Упорная плоскость обеспечивает валу при  $\gamma > \arccos d/D$  контакт деталей в трех точках и необходимое для их совмещения плоскопараллельное движение.

Способ сборки (патент РФ 2213336544 23Р 19/04) предусматривает закрепление втулки  $1$  в горизонтальном положении (рис. 5), а на уровне образующей внутренней поверхности втулки горизонтально располагают упорную плоскость  $2$ . Один конец вала  $3$  помещают внутрь отверстия втулки  $1$  наклонно к ее оси так, чтобы вал опирался нижней точкой своей кромки на упорную плоскость и одновременно касался кромки отверстия втулки в трех точках, свободный его конец опирают на подвижный упор, выполненный в виде ролика  $4$ ; затем валу сообщают плоскопараллельное движение, опуская ролик вниз до момента совмещения кромок обеих деталей, после чего вал перемещают

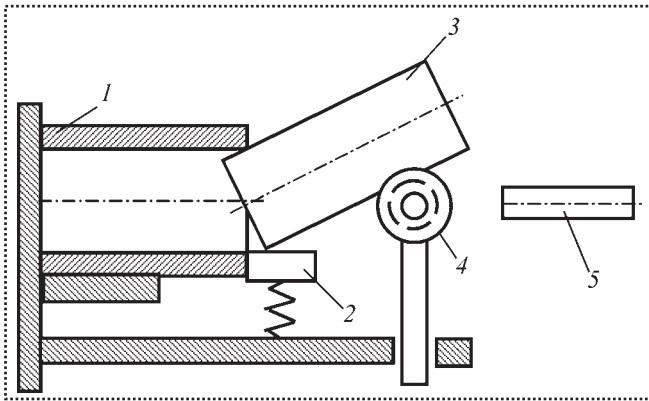


Рис. 5. Устройство для горизонтальной сборки цилиндрических деталей

внутри втулки, воздействуя на него толкателем 5. Отличительным признаком данного способа сборки является горизонтальное закрепление втулки и плоскопараллельное движение вала, при котором нижняя точка совмещаемой кромки вала перемещается по опорной плоскости прямолинейно вдоль образующей отверстия втулки, что обеспечивает контакт деталей в трех точках и исключает их заклинивание.

Особенности движения точки  $A$  позволяют определить скорости всех точек вала в процессе совмещения с помощью мгновенного центра скоростей. Скорость точки  $A$  направлена по прямой  $AA_1$  (рис. 6), скорость точки  $K$  контакта деталей направлена по образующей вала. Мгновенный центр скоростей вала  $L$  находится в точке пересечения перпендикуляров, проведенных к скоростям в точках  $A$  и  $K$ . Так как треугольники  $KLL_1$  и  $BAA_1$  равны, то отрезки  $O_1L_1$  и  $O_1B$  также равны, значит  $O_1L_1 = S_1$ , т.е. отрезок  $BL$  проходит через точку пересечения осей деталей  $O_3$  и делится этой точкой пополам.

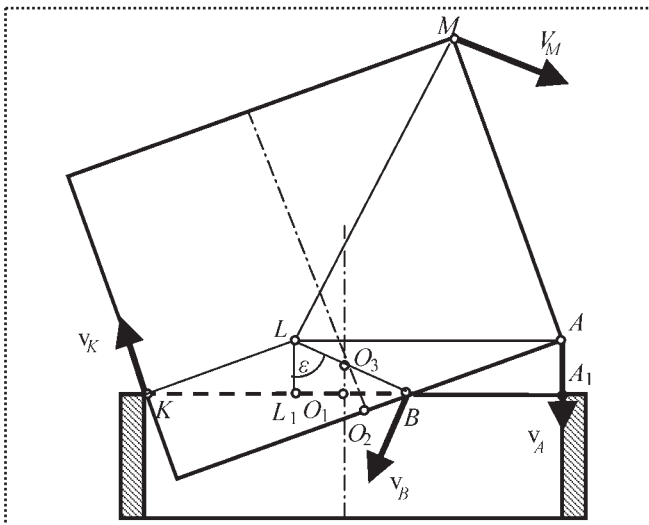


Рис. 6. Распределение скоростей при движении вала в процессе совмещения

Скорость любой точки вала при плоскопараллельном движении перпендикулярна отрезку, соединяющему эту точку с мгновенным центром скоростей  $L$  и равна произведению угловой скорости вала на расстояние до мгновенного центра скоростей.

Скорость точки  $K$  равна  $v_K = \dot{\gamma}KL$ .

Скорость точки  $B$ , лежащей в плоскости симметрии деталей в середине отрезка  $B_1B_2$  будет направлена перпендикулярно отрезку  $BL$  и равна  $v_B = \dot{\gamma}BL$ . Векторы скоростей симметричных точек контакта  $B_1$  и  $B_2$ , в силу того, что они расположены на одной прямой, проходящей через точку  $B$  перпендикулярно плоскости симметрии деталей, в соответствии с закономерностями плоскопараллельного движения, будут параллельны скорости точки  $B$  и равны ей по величине.

## 2. Анализ сил взаимодействия в точках контакта

Силы, приложенные к валу со стороны сборочного устройства и сообщающие ему плоскопараллельное движение, в общем случае приводятся к силе  $F$  и паре сил с моментом  $M$ , расположенным в плоскости симметрии деталей.

В каждой точке контакта на вал действуют две силы: нормальная реакция и сила трения. Нормальная реакция  $N_K$  в точке  $K$  направлена перпендикулярно образующей вала в этой точке, сила трения – по этой образующей и равна  $F_K = fN_K$ .

Нормальная реакция в каждой из симметричных точек контакта должна лежать одновременно в двух плоскостях. Одна из них, являясь нормальной по отношению к кромке вала, проходит через ось вала, другая – через ось втулки, следовательно, силы, действующие на вал в точках  $B_1$  и  $B_2$ , будут лежать на линии пересечения этих осей и каждая из этих сил пойдет по прямой, соединяющей точку контакта с точкой  $O_3$  пересечения осей вала и втулки, т.е. реакции  $N_{B1}$  и  $N_{B2}$ , приложенные к валу в симметричных точках контакта  $B_1$  и  $B_2$ , проходят через точку  $O_3$ . Кроме того, при плоскопараллельном движении вала нормальные реакции  $N_{B1}$  и  $N_{B2}$  в симметричных точках контакта равны по модулю, а их равнодействующая  $N_B$  направлена по прямой, соединяющей точку  $B$  (середину отрезка  $B_1B_2$ ) с точкой  $O_3$  пересечения осей вала и втулки, и, следовательно, проходит через мгновенный центр скоростей  $L$ . Модуль равнодействующей (рис. 7)

$$N_B = 2N_{B1} \sin \alpha,$$

$$\text{где } \sin \alpha = \frac{O_3B}{O_3B_1}.$$

Силы трения  $F_{B1}$  и  $F_{B2}$ , приложенные в точках  $B_1$  и  $B_2$  (рис. 8), также равны, параллельны и приводятся к равнодействующей

$$F_B = 2fN_{B1}.$$

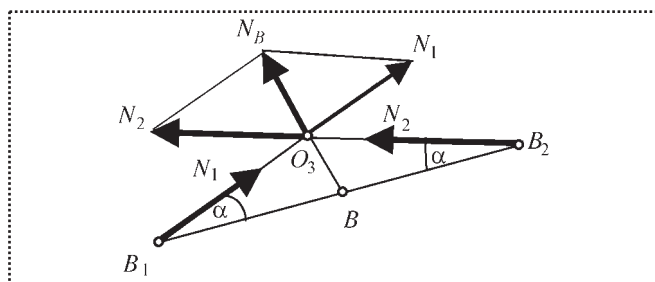


Рис. 7. Нормальные реакции в симметричных точках контакта

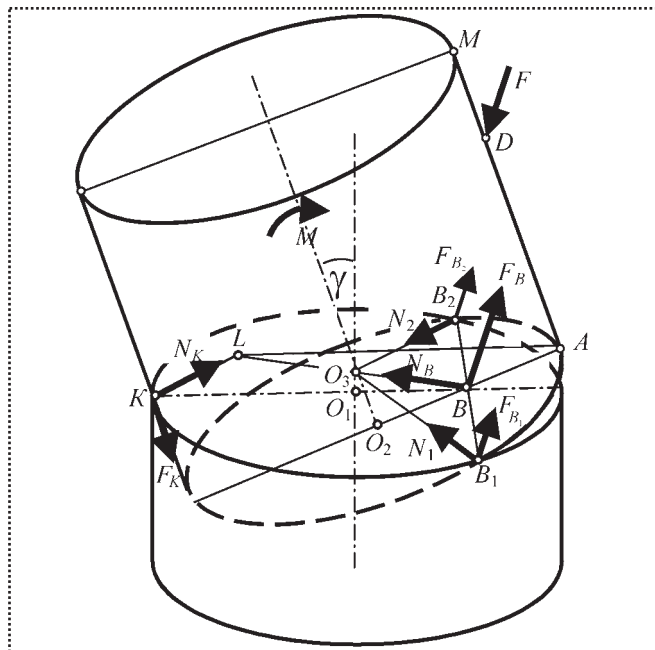
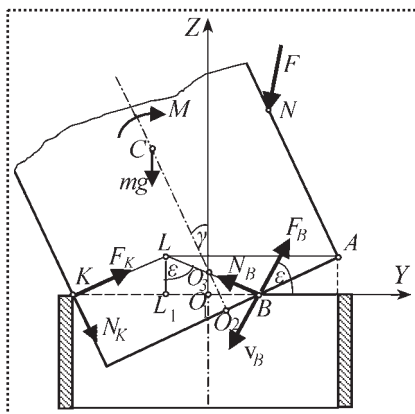


Рис. 8. Нормальные реакции и силы трения в точках контакта

Рис. 9. Распределение сил при плоскопараллельном движении вала



Таким образом, система сил, действующих на вал, расположена в плоскости симметрии деталей (рис. 9).

### 3. Динамика процесса совмещения

В общем случае положение тела, совершающего плоскопараллельное движение, определяется положением его центра масс и углом поворота вокруг этого центра, и имеет три степени свободы. Координаты

центра масс вала при плоскопараллельном движении в процессе совмещения, характеризуемом контактом деталей в трех точках, однозначно определяются углом  $\gamma$  между осями деталей

$$y_c = -0,5H \sin \gamma + \frac{D-d \cos \gamma}{2};$$

$$z_c = 0,5H \cos \gamma - S_1 \sin \gamma.$$

Таким образом, вал имеет одну степень свободы, а угол  $\gamma$  является обобщенной координатой. Движение вала в таком случае описывается дифференциальным уравнением в форме Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \gamma} = Q_\gamma,$$

где  $T$  – кинетическая энергия вала;  $Q_\gamma$  – обобщенная сила.

Кинетическая энергия вала, совершающего плоскопараллельное движение, равна

$$T = \frac{m v_c^2}{2} + \frac{I_{cx} \omega^2}{2},$$

где  $m$  – масса вала;  $v_c$  – скорость центра масс вала;  $I_{cx}$  – момент инерции вала относительно оси, проходящей через его центр масс перпендикулярно плоскости симметрии деталей;  $\omega = \dot{\gamma}$  – угловая скорость вала.

Заменив  $v_c^2 = \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2$ , получим

$$T = \frac{m(\dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2)}{2} + \frac{I_{cx} \dot{\gamma}^2}{2},$$

где  $\dot{y}_c = \frac{dy_c}{dt}$ ,  $\dot{z}_c = \frac{dz_c}{dt}$  – проекции скорости  $\bar{v}_c$  на оси координат.

Выполним необходимые преобразования:

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} = m \left( \frac{dy_c}{d\gamma} \frac{d^2 y_c}{d\gamma^2} + \frac{dz_c}{d\gamma} \frac{d^2 z_c}{d\gamma^2} \right) \dot{\gamma}^2,$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} = m(\dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2) \dot{\gamma} + I_{cx} \dot{\gamma};$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} &= m \left[ \left( \frac{dy_c}{d\gamma} \right)^2 + \left( \frac{dz_c}{d\gamma} \right)^2 \right] \ddot{\gamma} + \\ &+ I_{cx} \ddot{\gamma} + 2m \left( \frac{dy_c}{d\gamma} \frac{d^2 y_c}{d\gamma^2} + \frac{dz_c}{d\gamma} \frac{d^2 z_c}{d\gamma^2} \right) \dot{\gamma}^2. \end{aligned}$$

Тогда левая часть уравнения Лагранжа принимает вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\gamma}} - \frac{\partial T}{\partial \gamma} &= m \left[ \left( \frac{dy_c}{d\gamma} \right)^2 + \left( \frac{dz_c}{d\gamma} \right)^2 \right] \ddot{\gamma} + \\ &+ I_{cx} \ddot{\gamma} + m \left( \frac{dy_c}{d\gamma} \frac{d^2 y_c}{d\gamma^2} + \frac{dz_c}{d\gamma} \frac{d^2 z_c}{d\gamma^2} \right) \dot{\gamma}^2. \end{aligned}$$



Плоскопараллельное движение вала, приводящее к совмещению деталей, в каждый момент времени можно представить как вращение вокруг мгновенного центра скоростей  $L$ . Следовательно, обобщенная сила будет равна сумме моментов относительно мгновенного центра скоростей всех сил, приложенных к валу:

$$Q_\gamma = m_L(\bar{F}) + M + m_L(m\bar{g}) + m_L(\bar{F}_K) + m_L(\bar{F}_B).$$

Приравняв правую и левую части уравнения Лагранжа, получим

$$m(\dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2)\ddot{\gamma} + m\left(\frac{dy_C}{d\gamma} \frac{d^2 y_C}{d^2 \gamma} + \frac{dz_C}{d\gamma} \frac{d^2 z_C}{d^2 \gamma}\right)\dot{\gamma}^2 + I_{Cx}\dot{\gamma}^2 = (1) \\ = m_L(\bar{F}) + M + m_L(m\bar{g}) + m_L(\bar{F}_K) + 2m_L(\bar{F}_B).$$

Из уравнения (1) следует, что движение вала внутрь отверстия возможно в том случае, когда правая часть этого уравнения больше нуля, т.е.

$$m_L(\bar{F}) + M + m_L(m\bar{g}) + m_L(\bar{F}_K) + 2m_L(\bar{F}_B) > 0.$$

Следовательно, при контакте в трех точках заклинивание деталей происходит при условии, что эта сумма меньше или равна нулю:

$$m_L(\bar{F}) + M + m_L(m\bar{g}) + m_L(\bar{F}_K) + 2m_L(\bar{F}_B) \leq 0.$$

Ранее в работе [1] было установлено, что заклинивание деталей, контактирующих двумя точками, происходит при таком же соотношении действующих сил, т.е. условие заклинивания не изменилось при смене характера контакта между деталями.

Дополним уравнение (1) уравнениями движения центра масс вала

$$m \frac{d^2 y_C}{dt^2} = \sum F_{ky}, \quad m \frac{d^2 z_C}{dt^2} = \sum F_{kz},$$

где суммы проекций всех приложенных к валу сил на оси координат равны (см. рис. 8):

$$\sum F_{ky} = F_y + N_K \cos \gamma + F_K \sin \gamma - N_B \sin \varepsilon + F_B \cos \varepsilon; \\ \sum F_{kz} = F_z - mg + N_K \sin \gamma - F_K \cos \gamma + N_B \cos \varepsilon + F_B \sin \varepsilon. \\ \text{Заменим } F_B = 2F_1 = 2fN_{B1}, \quad N_B = 2N_{B1} \sin \alpha.$$

$$m \frac{d^2 y_C}{dt^2} = F_y + N_K (\cos \gamma + f \sin \gamma) - \\ - 2N_{B1} (\sin \alpha \sin \varepsilon - f \cos \varepsilon); \quad (2)$$

$$m \frac{d^2 z_C}{dt^2} = F_z - mg + N_K (\sin \gamma - f \cos \gamma) + \\ + 2N_{B1} (\sin \alpha \cos \varepsilon + f \sin \varepsilon). \quad (3)$$

Система дифференциальных уравнений (1), (2), (3) описывает закономерности движения вала, характеризующие процесс совмещения цилиндрических деталей при контакте между ними в трех точках.

На основе пакета Mathcad был составлен алгоритм решения дифференциальных уравнений, позволяющий находить значения сборочных усилий, обеспечи-

вающих процесс совмещения деталей, и сил взаимодействия в точках контакта в зависимости от угла  $\gamma$  между осями деталей. В результате было установлено, что силы взаимодействия резко возрастают при уменьшении угла между осями и достигают максимальных значений в тот момент, когда он приближается к значению  $\gamma = \arccos d/D$ . Так для деталей с параметрами  $D = 50$  мм,  $\delta = 0,01$  мм,  $H = 70$  мм, установленных первоначально под углом  $\gamma = 10^\circ$ , силы взаимодействия в точках контакта возрастали более чем в 100 раз. Таким образом, нормальные реакции, оказывающие важное влияние на процесс совмещения, при достижении определенных значений могут стать причиной повреждения или заклинивания деталей

Полученная система дифференциальных уравнений позволяет решить и обратную задачу, т.е. определить уравнение движения вала  $\gamma = \gamma(t)$  в зависимости от действующих на него сборочных усилий и может быть полезной для замыкания уравнений манипулятора и уравнений движения вала при исследовании особенностей автоматической сборки с помощью промышленных роботов. Установленные закономерности необходимо учитывать при построении математической модели поисковых движений в процессе предварительной ориентации деталей.

### Выводы

1. Проведены кинематический и силовой анализы процесса совмещения цилиндрических деталей с гарантированным зазором для вертикальной схемы сборки, при которой вал опирается на три точки кромки отверстия закрепленной втулки.

2. Установлены траектории и скорости точек вала, определены направления всех сил взаимодействия в точках контакта.

3. Разработана динамическая модель процесса совмещения деталей, в которой система дифференциальных уравнений определяет закономерности движения вала в зависимости от действующих на него сил, что позволяет анализировать надежность и качество способов сборки и реализующих их устройств.

4. Установленные закономерности необходимо учитывать и при разработке как способов предварительной ориентации, так и в процессе поисковых движений.

### Библиографический список

1. Холодкова А.Г. Особенности автоматического выполнения цилиндрических соединений с малыми зазорами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 4. С. 14–17.
2. Черняховская Л.Б. Исследование процесса совмещения цилиндрических деталей с гарантированным зазором: авторефер. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 1983. 10 с.
3. Черняховская Л.Б. Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. 76 с.



# СБОРКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛЕЕВ

УДК 621.792; 62-50: 62-525: 628

**В.С. Безменов**, д-р техн. наук (Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН),  
**А.В. Игнатов**, канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: avlig@yandex.ru

## Автоматизация сборки клеевых соединений в машиностроении с высоковязкими и пастообразными клеевыми композициями

Представлены особенности автоматизации сборки клеевых соединений в машиностроении с высоковязкими и пастообразными клеевыми композициями. Рассмотрена разработанная авторами система автоматизированного дозирования высоковязких клеевых составов, строящаяся на основе метода измерения полного давления на входе в линию транспортировки клеевых композиций на позицию сборки и исключаящая наличие газовой фазы в дозируемом составе.

The features of adhesive assembling automatization in machine engineering using high-viscosity and pastelike adhesive compositions are presented. The developed system for automatized dosing of high-viscosity adhesive composition that is based on the method of full pressure measuring at the beginning of a line for liquid transportation to assembling work station and excludes gas phase presence at dosed composition is considered.

**Ключевые слова:** технологический процесс сборки, клеевая композиция, клеевое соединение, средства автоматизации.

**Keywords:** assemblage technological process, adhesive composition, glue junction, automation.

**В** современном машиностроении используется большое количество клеевых соединений, сборка большого числа из которых требует автоматизации. Автоматизация клеевых соединений производится в трех обобщенных случаях: при необходимости обеспечения высокой производительности сборки; при применении опасных для здоровья человека клеевых композиций и их отдельных компонентов; при необходимости обеспечения точности сборки, которой нельзя достичь в ручном режиме.

Рассматривая клеевые соединения, необходимо провести их четкое классификационное разграничение по функциональному признаку на силовые (адгезивные) и герметичные (когезивные).

**Силовые соединения** – соединения, созданные на основе клеевых композиций (клеев), главной задачей которых является обеспечение прочных адгезионных связей между субстратами. Адгезионные связи обеспечивают прочность сцепления между поверхностями разнородных тел за счет образования химических связей или взаимной диффузии на межмолекулярном уровне. Другими словами, адгезионные связи образуются в приграничном слое клей–металл и обеспечивают прочность клеевого соединения.

**Герметичные соединения** – соединения, созданные на основе клеевых композиций (герметиков), главной задачей которых является обеспечение прочных когезионных связей в клеевом шве. При этом прочных адгезионных характеристик от таких составов не требуется. Когезионные связи обеспечивают взаимное притяжение между молекулами в объеме данного тела. Другими словами, когезионные связи образуются внутри объема клеевого состава после его отверждения и отвечают за герметичность соединения.

При разработке технологического процесса сборки клеевых соединений большое внимание уделяется операциям нанесения клеевых композиций. Вызвано это тем, что на этапе нанесения должна обеспечиваться требуемая толщина клеевого слоя, равномерность его нанесения по всей траектории, а также должно учитываться количество смазываемых клеем поверхностей. От этих параметров клеевого шва зависит конечная прочность соединения.

Высоковязкие и пастообразные клеевые композиции часто применяют для создания герметичных соединений. К этим композициям относят некоторые виды анаэробных составов, различные каучуки, теоловые и эпоксидные модернизированные композиции. Последние занимают заметное место при создании силовых клеевых соединений, а также при работах по реновации изделий.

При изготовлении оборудования, применяемого в автоматизированных сборочных производствах с применением клеевых соединений, наиболее сложными задачами, с точки зрения достижения требуемых технологическим регламентом выходных параметров соединения, являются транспортировка клее-



вых композиций к месту сборки и их отмеривание (дозирование).

Проектирование автоматизированных устройств нанесения клеевых композиций повышенной вязкости вызывает наибольшие трудности. Связано это с рядом проблем, возникающих в основном при транспортировке этих клеевых композиций к месту сборки. Среди таких проблем можно назвать склонность к образованию мелких воздушных пузырьков (газовой фазы) в высоковязких составах, которые усложняют процесс точного дозирования, трудно удаляются из клеевого шва, где являются причиной возникновения концентраторов напряжений, а также приводят к потере качества клеевого соединения.

С другой стороны, перемещение пастообразных и высоковязких композиций по транспортной системе к месту сборки требует применения значительных сил, что заставляет задействовать установки, увеличивающие громоздкость оборудования и себестоимость процесса нанесения, что сказывается на конкурентоспособности изделия. К тому же следует отметить, что и в этом случае не всегда удается обеспечить стабильное перемещение клеевой композиции по транспортной системе, а если и удается, то последняя часто нуждается в регламентных работах, что также сказывается на себестоимости. Другая проблема при использовании силовых установок для транспортировки высоковязких композиций — их повышенная энергоемкость.

Высоковязкие клеевые композиции, особенно пастообразные, весьма чувствительны к различным изменениям траектории перемещения. Любой резкий перегиб транспортной системы приводит к заметному изменению скорости течения композиции. Такая ситуация чревата тремя серьезными последствиями. Первое очевидно: требуются еще большие силы для транспортировки клеевой композиции к месту сборки. Второе — возможность расслоения многокомпонентного клеевого состава с потерей его эксплуатационных характеристик и соответствующим снижением качества собранного изделия. Третье — застойные явления в местах перегиба транспортной системы, которые ведут к образованию затвердевших клеевых пробок. Образование пробок способно полностью блокировать транспортировку клеевых композиций, при этом ремонтные работы часто заканчиваются необходимостью полного демонтажа и замены части оборудования.

У различных клеевых композиций своя химическая природа процесса отверждения. Некоторые из них отвердевают в присутствии кислорода воздуха, а какие-то наоборот, при его отсутствии, другие — при добавлении отвердителя, третьи — при повышении температуры и т.д. Нетрудно заметить, что все эти условия могут возникнуть в процессе транспортировки клеевой композиции внутри замкнутой системы.

Особенно это касается уже перемешанных композиций, в частности, с добавленным отвердителем. Все это говорит о том, что внутри транспортной системы возникают условия, благотворно влияющие на процесс отверждения. Если этот процесс запускается, то возможны два пути его развития. Первый — клеевая композиция затвердевает внутри автоматизированной установки по ее нанесению. В этом случае требуется, как правило, полная замена вышедших из строя узлов установки. Второй — клеевая композиция доходит до места сборки, однако уже запущенный внутри полимера процесс отверждения приводит к резкому изменению эксплуатационных характеристик клеевого соединения. Прежде всего это сказывается на прочности соединения и его долговечности.

Указанные трудности при транспортировке высоковязких и пастообразных клеевых композиций заставляют прибегать проектировщиков систем их нанесения к ряду конструкторских приемов. Например, стараются резко сокращать путь транспортировки, что не всегда приемлемо для реального производства, особенно в условиях автоматизации технологического процесса сборки клеевого соединения. Другой прием — увеличение сечения транспортного трубопровода, что усложняет точное дозирование, особенно малых объемов. Погрешности точности порций, подаваемых на позицию сборки, как правило, не сказываются на прочностных характеристиках соединения. В этом случае система настраивается на избыточную дозировку порции клея. Однако такой прием приводит к перерасходу клеевой композиции и потере дизайнерских и эргономических показателей, а иногда — к необходимости привлечения ручного труда на автоматизированной линии для удаления излишков клеевой композиции, вытесненных из соединения.

Как правило, пастообразные и высоковязкие клеевые композиции имеют не гомогенные, а многокомпонентные составы, поэтому к автоматизированным устройствам их нанесения предъявляют дополнительные требования. Неоднородность композиции не допускает длительного ожидания в системе до начала работы дозирующего устройства. В композиции могут начаться процессы оседания компонентов, что меняет химическую структуру состава по его объему, а следовательно, и свойства клеевой композиции, влияющей на качество соединения. Для поддержания композиции в рабочем состоянии в устройстве автоматизированного дозирования и нанесения вводят функциональные узлы по ее перемешиванию. В ряде случаев такая функция необходима даже при условии кратковременного хранения композиции в устройстве.

В настоящее время число поставщиков автоматизированного оборудования для транспортировки и дозирования высоковязких и пастообразных клеевых составов, удовлетворяющего условиям сборочных ма-



шиностроительных производств, ограничено (см., например, работы [3–5]). Предлагаемое оборудование имеет следующие недостатки, сужающие область его применения в сборочных производствах:

- сложность конструкций узлов дозирования и управления, содержащих большое количество гидрозапорных и механических подвижных частей, что приводит к снижению эксплуатационной надежности оборудования в целом;
- неприспособленность одного и того же типа оборудования к дозированию сред с различными физико-химическими свойствами и в широком диапазоне;
- узкие функциональные возможности, выражающиеся в отсутствии средств оперативной перенастройки и регулировки выходных параметров дозирующих устройств;
- высокая стоимость оборудования.

Заметим, что заявленные в сайтах компаний характеристики оборудования не всегда соответствуют действительности. Более того, рекламируемые ими установки иногда находятся только в стадии разработки.

Поэтому является актуальной задача разработки специализированных систем дозирования высоковязких и пастообразных клеевых составов для сборочных машиностроительных производств, обеспечивающих достаточно широкий диапазон дозирования и независимость принципа действия системы и ее состава от физико-химических свойств дозируемых компонентов.

В этой связи целесообразно обратиться к результатам работы сотрудников лаборатории газогидродинамических средств автоматизации Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), касающихся принципов построения систем автоматизированного дозирования (САД) жидкостей [1], использующих методы отмеривания дозы по косвенным параметрам и исключающих необходимость применения в их составе мерных камер и какого-либо насосного оборудования с механическими подвижными элементами.

В частности, наиболее приемлемым для сборочных производств является рассмотренный в работе [1] метод объемного дозирования с контролем отмеривания дозы по времени.

Суть данного метода заключается в организации напорного истечения жидкости из замкнутого герметичного расходного резервуара с постоянным расходом, обеспечиваемым регулятором перепада давлений на линии транспортировки (ЛТ) жидкости. При этом величина дозы определяется временем дозирования (промежутком времени, на который открывается установленный на ЛТ пневмоклапан) и проходными сечениями гидрокommunikаций.

Данный метод не является абсолютно новым и частично реализован в дозаторе ПП/ПР-34Ц компании НТФ "Техно-Альянс Электроникс", представлен-



Рис. 1. Дозатор ПП/ПР-34Ц НТФ "Техно-Альянс Электроникс"

ном на рис. 1 [6]. По сообщению компании "цифровые автоматические дозаторы жидкости ПП/ПР-34Ц предназначены для дозирования различных технологических жидкостей низкой и средней вязкости, таких как: клеи, герметики, жидкие смазки. Дозирование осуществляется через внешний клапан с подачей жидкого материала под давлением из резервуара".

Недостатком данного устройства является наличие систематической погрешности дозирования, вызываемой изменением уровня жидкости в расходном резервуаре (РР) по мере ее расходования в процессе дозирования. В представленном дозирующем устройстве данная погрешность минимизируется посредством существенного повышения рабочего давления в РР с одновременным вынужденным уменьшением проходного сечения гидрокommunikаций ЛТ ("присоединительные размеры продуктопровода – трубка диаметром 5/3 мм"), что приводит к существенному снижению диапазона дозирования и увеличению стоимости изготовления РР, конструкция которого должна обеспечивать безопасную эксплуатацию под высоким избыточным давлением. Компанией НТФ "Техно-Альянс Электроникс" выпускаются резервуары различного объема, рассчитанные на работу при разном максимальном давлении. Можно выбрать резервуар объемом от 1 до 250 л на рабочее давление от 2 до 12 атм (2...12 бар). Резервуар может быть изготовлен из полимера, алюминиевого сплава, коррозионно-стойкой или простой стали, которая должна иметь гальваническое покрытие.

Для исключения указанной ранее погрешности рассмотрим более детально показанную на рис. 2 схему транспортировки жидкости под действием избыточного давления сжатого воздуха, создаваемого в замкнутом РР, и определим условия, при которых

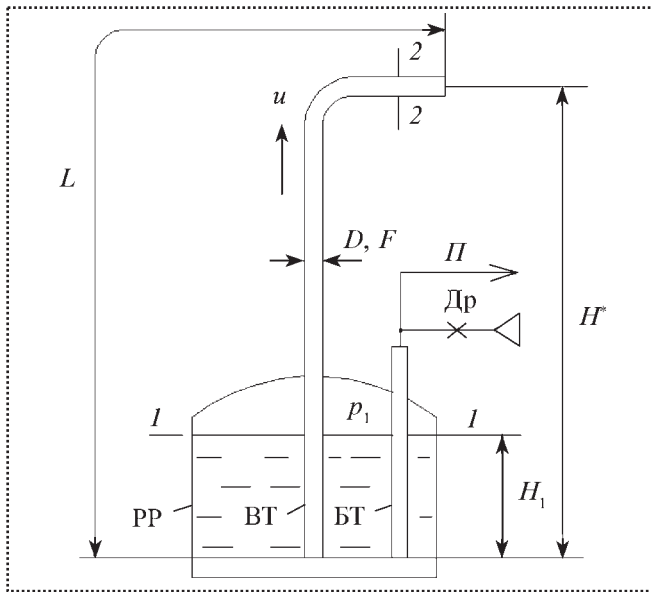


Рис. 2. Схема транспортировки жидкости под действием избыточного давления сжатого воздуха с барботажной трубкой

данное устройство напорного истечения может быть использовано в качестве порционного дозирующего устройства (ДУ).

При произвольном характере изменения избыточного давления  $p_1$  сжатого воздуха в РР течение жидкости в выходном трубопроводе (ВТ) резервуара описывается дифференциальным уравнением Бернулли для неустановившегося турбулентного движения несжимаемой жидкости, которое для выделенных сечений 1–1 и 2–2 имеет вид:

$$p_1 / \rho g + H_1 = [1 + \zeta + \lambda(L/D)](u/2g) + H^* + (L/g)(du/dt), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;

$u$  – средняя по сечению трубопровода скорость течения;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$H_1$  – уровень жидкости в РР;

$\zeta = \text{const}$  – коэффициент местного сопротивления на входе в трубопровод;

$\lambda$  – коэффициент трения, зависящий от текущего значения числа Рейнольдса  $Re = \rho Du/\mu$  и от динамической вязкости жидкости  $\mu$  и рассчитываемый для турбулентного течения по формуле Блазиуса:  $\lambda = 0,316 (\rho Du/\mu)^{-1/4}$ ;

$L$  и  $D$  – длина и внутренний диаметр трубопровода;

$H^*$  – высота истечения;

$t$  – время.

Анализ уравнения (1) показывает, что если в процессе истечения жидкости поддерживать постоянным

полное давление  $\Pi = p_1 + \rho g H_1$  на входе в трубопровод, то при постоянных значениях плотности и вязкости жидкости, а также высоты истечения  $H^*$  рассматриваемое течение будет установившимся. При этом скорость течения жидкости в трубопроводе  $u = \text{const}$  и соответствующее установившееся значение объемного расхода жидкости  $Q = uF$  (где  $F = \pi D^2/4$  – площадь сечения трубопровода) рассчитываются по формуле:

$$Q = kF[(2/\rho)(\Pi - \rho g H^*)]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $k = 1/[1 + \zeta + \lambda(L/D)]^{1/2}$  – коэффициент расхода.

Таким образом, поддерживая с помощью автоматического регулятора постоянное (не зависящее от текущей величины  $H_1$  уровня жидкости в РР) значение полного давления  $\Pi$ , можно реализовывать процессы непрерывного дозирования с регулируемой (в зависимости от величины  $\Pi$ ) производительностью.

Автоматическая стабилизация параметра  $\Pi$  на заданном постоянном уровне  $\Pi_3$  наиболее просто может быть реализована с помощью пневматического пропорционального регулятора, работающего по информационным сигналам от установленной в РР и продуваемой сжатым воздухом через постоянный дроссель (Др) с малым расходом барботажной трубки (БТ), которая выполняет функцию датчика полного давления  $\Pi = p_1 + \rho g H_1$ . Для реализации на основе рассмотренного ДУ непрерывного действия операций порционного дозирования достаточно дополнить его схему отсечным пневмоклапаном, служащим для прерывания потока. Поскольку при открытом положении клапана объемный расход  $Q$  является постоянным, отмеривание заданной величины дозы может осуществляться по времени.

Рассмотренный метод стабилизации полного давления на входе в линию транспортировки дозируемой жидкости из замкнутого РР с помощью барботажного измерителя наиболее эффективен для дозирования большинства пищевых и технических жидкостей различной вязкости и апробирован на целом ряде малых производств упаковочной отрасли [1]. Однако использование данного метода для транспортировки и дозирования высоковязких и тем более пастообразных клеевых составов сборочных производств является неприемлемым. Дело в том, что высоковязкие клеевые композиции насыщаются мелкими пузырьками воздуха в процессе барботажа, и это приводит к потере качества клеевого соединения. Поэтому был разработан новый метод измерения полного давления, исключающий наличие газовой фазы в дозируемой жидкости.

Предлагаемый метод иллюстрируется на рис. 3. В отличие от показанной на рис. 2 схемы транспортировки жидкости из РР, снабженного продуваемой сжатым воздухом БТ – измерителем полного давления  $\Pi$ , РР на рис. 3 оборудован измерительной труб-



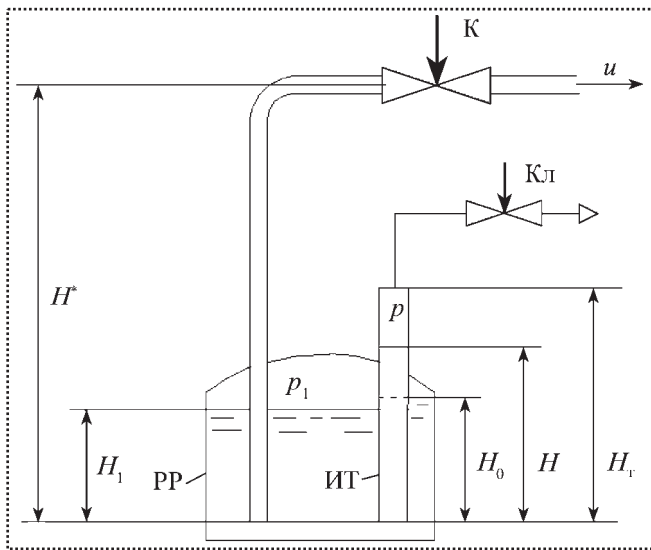


Рис. 3. Схема транспортировки жидкости под действием избыточного давления сжатого воздуха с измерительной трубкой

кой (ИТ), в которую воздух не подается. В отсутствие избыточного давления  $p_1$  в РР верхняя часть ИТ (ее газовая полость) через нормально открытый пневмоклапан (Кл) сообщается с атмосферой, и ИТ заполняется дозируемой жидкостью до уровня  $H_0$  – начального уровня наполнения РР.

При подаче давления  $p_1$  в РР клапан Кл закрывается, и газовая полость ИТ герметизируется. Под действием давления  $p_1$  при закрытом положении клапана дозирования К на линии транспортировки жидкости к потребителю повышается ее уровень в ИТ и, соответственно, избыточное давление  $p$  в ее газовой полости. При  $p_1 = \text{const}$  и по окончании переходного процесса изменения давлений  $p_1$  и  $p$  (в установившемся режиме) имеет место равенство гидростатических давлений:

$$\Pi = p_1 + \gamma H_1 = p + \gamma H, \quad (3)$$

где  $H$  – уровень жидкости в ИТ в установившемся режиме.

Исключим параметр  $H$  из равенства (3) с помощью уравнения газового состояния в ИТ, которое для модели изотермического процесса сжатия газа и цилиндрической формы ИТ с постоянным по ее высоте сечением можно представить в виде

$$(p + P_a)(H_t - H) = P_a(H_t - H_0), \quad (4)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление;  $H_t$  – высота ИТ;  $H_0$  – начальный уровень жидкости в РР, имеющий место до подачи в него давления  $p_1$ .

После преобразований получим равенство:

$$\Pi = p + \gamma[(pH_t + P_a H_0)/(p + P_a)]. \quad (5)$$

Анализ равенства (5) показывает, что если в процессе истечения жидкости из РР через открытый на операции дозирования клапан К поддерживать с помощью пневматического регулятора постоянным давление  $p$  в ИТ ( $p = p_3 = \text{const}$ , где  $p_3$  – заданное значение избыточного давления в газовой полости ИТ), а также производить очередное пополнение РР до постоянного начального уровня ( $H_0 = \text{const}$ ), то полное давление  $\Pi$  также будет постоянным:

$$\Pi = p_3 + \gamma[(p_3 H_t + P_a H_0)/(p_3 + P_a)] = \text{const}.$$

При  $\Pi = \text{const}$  и постоянных значениях плотности и вязкости жидкости, а также высоты истечения  $H^*$ , рассматриваемое течение будет установившимся с постоянным значением, определяемого выражением (2), объемного расхода  $Q$ .

На рис. 4 показана принципиальная схема пневмоэлектронной САД с отмериванием дозы по времени, в которой реализован рассмотренный метод измерения полного давления на входе в линию транспортировки клеевого состава на позицию сборки. САД содержит объект управления (ОУ) – технологическое оборудование дозирующего устройства и пневмоэлектронное устройство управления (УУ). В состав ОУ входят стальной герметичный РР с дозируемым клеевым составом, оборудованный погруженными в жидкость стальными измерительной (ИТ) и питающей (ПТ) трубками и вентилем В1 для стравливания воздуха. Выходной канал ИТ подключается к УУ через вентиль В2. Питающая трубка является элементом линии транспортировки (ЛТ) клеевого состава на позицию сборки. Последняя содержит также нормально открытый двухпозиционный пережимной пневмоклапан К и установленный непосредственно на позиции сборки сменный сливной наконечник СН (трубка и игла, подбираемые экспериментальным путем в зависимости от требуемого диапазона дозирования). В состав ОУ включены также сенсорная пусковая кнопка (СК) – электрический емкостной датчик для подачи команды на дозирование и образцовый манометр (МО) для установки и контроля настроечных параметров системы.

Устройство управления содержит пневматический пропорциональный регулятор (РД) давления  $p$  в газовой полости ИТ и временное устройство (ВУ) – электронный таймер. Устройство управления обеспечивает выполнение следующих функций:

- включение системы и ее подготовку к работе (заполнение ЛТ дозируемым составом);
- автоматическое поддержание заданной постоянной величины давления  $\Pi$  на входе в ПТ в процессе нанесения клеевой композиции и сборки соединения;
- плавную подстройку (в зависимости от вязкости клеевого состава) и контроль по МО заданного ( $p_3$ ) и

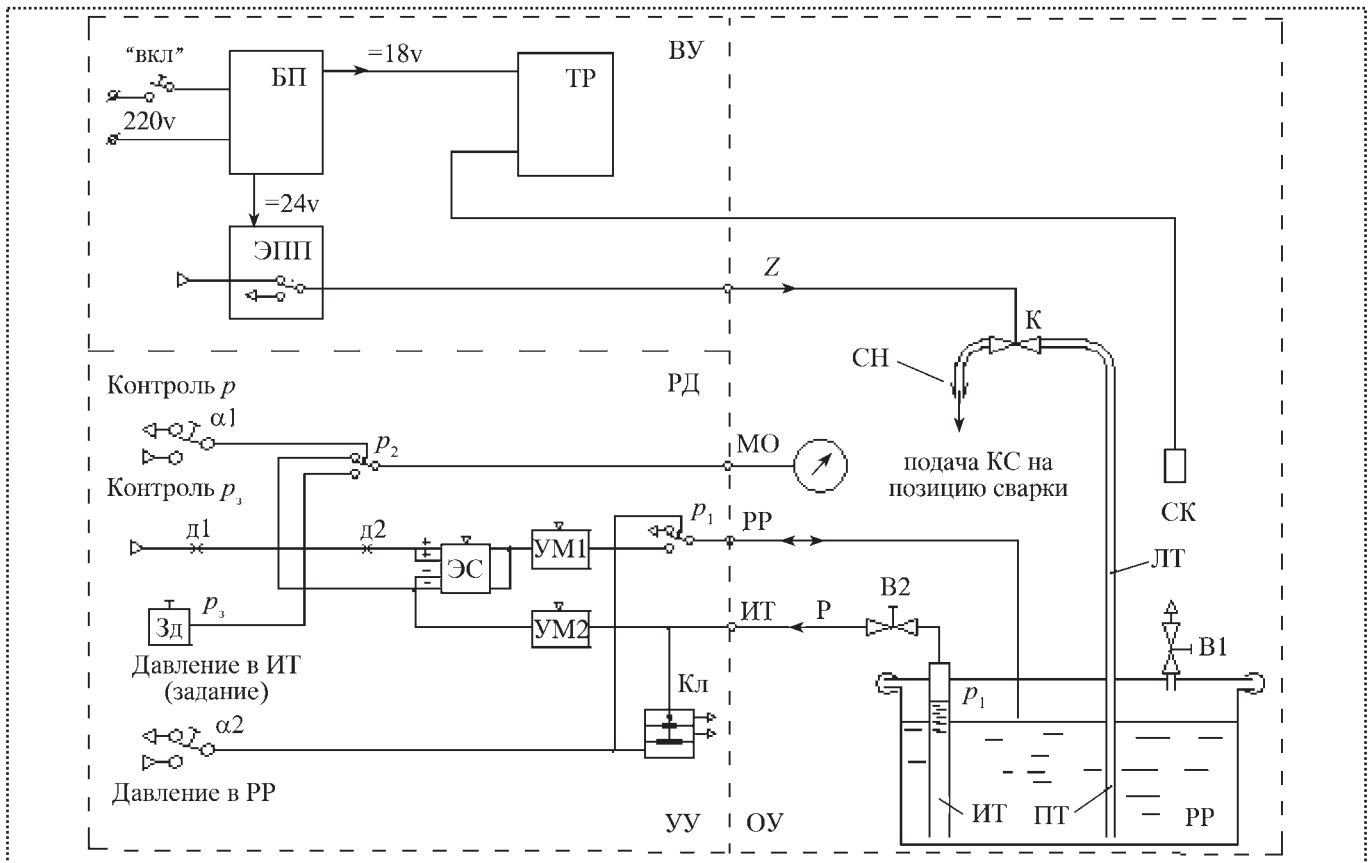


Рис. 4. Принципиальная схема САД клеевого состава

**Спецификация пневмоэлементов УУ по рис. 4**

Обозначение на схеме	Наименование и тип элемента	Количество
ЭС	Элемент сравнения П2ЭС.3	1
Зд	Задатчик маломощный П2Зд.3	1
УМ1, УМ2	Усилитель мощности П2П.7	2
д1, д2	Дроссель постоянный П2Д.4-2	2
Кл	Клапан ПЗК.1	1
P1, P2	Реле РУП-1м	2
$\alpha 1, \alpha 2$	Пневмотумблер П1Т.2	2

фактического ( $p$ ) значений давления в газовой полости ИТ;

- подачу на позицию сборки (по команде оператора от кнопки СК) и оперативную подстройку заданных доз состава;

- опорожнение ЛТ по окончании работы, промывку или замену гидрокommunikаций.

Пневматический пропорциональный регулятор давления (РД)  $p$  реализован на элементах промышленной пневмоавтоматики системы УСЭППА [2]. Спецификация используемых в РД пневмоэлементов приведена в таблице.

Регулятор давления обеспечивает автоматическое поддержание заданной постоянной величины давления  $p$ , а следовательно, согласно равенству (5), давления  $P$  на входе в ПТ, обеспечивая постоянство величины расхода дозируемого состава в ЛТ при открытом положении клапана К и создавая тем самым возможность отмеривания дозы по времени. Регулятор давления содержит:

- задатчик Зд давления  $p_3$  с дросселем д1 в цепи питания;
- пневмотумблер  $\alpha 1$  "Контроль  $p_3/p$ " – для подключения к МО давления  $p_3$  (при включенном положении тумблера) или давления  $p$  (при выключенном положении);
- пневмотумблер  $\alpha 2$  "Давление в РР" – для включения в работу РД и герметизации газовой полости ИТ на время работы системы в режиме дозирования;



- реле P2 для коммутации на МО давлений  $p_3$  или  $p$ ;
- пятимембранный элемент сравнения ЭС с дросселем  $d_2$  на входе в его положительные камеры и усилителем мощности УМ1 на выходе элемента, выполняющие функцию пропорционального регулирования давления  $p$ ;
- усилитель мощности УМ2 в качестве точного мощного повторителя давления  $p$ , выход которого подключен ко входам в отрицательные камеры элемента сравнения;
- пневмоклапан Кл для коммутации газовой полости ИТ с атмосферой в отсутствие давления  $p_1$  в РР.

Электронное временное устройство (ВУ) вырабатывает командный сигнал ( $Z = 0$ ) на включение клапана К на время дозирования. Для его реализации использована электронная аппаратура фирмы STS Electronics (Болгария) [7]. Временное устройство включает в себя таймер (ТР) типа STS102-04FA с цифровой индикацией, блок питания (БП) типа STS312, выносную сенсорную пусковую кнопку (СК) – емкостной датчик типа СД18N1D2L/В, электропневмопреобразователь (ЭПП) типа П1РР.5 системы УСЭППА. Время дозирования задается в пределах 0...99,99 с с разрешающей способностью 0,01 с. Дозирование начинается при касании сенсорной кнопки СК. Окончание дозирования происходит через заданный интервал времени.

Питание пневмоэлементов УУ производится давлением 0,14 МПа (1,4 кгс/см<sup>2</sup>) от пневмосети (компрессора) с давлением 0,4...0,6 МПа через понижающий стабилизатор давления и раздаточный коллектор. Связи между УУ и технологическими элементами ОУ осуществляются через штуцеры внешних соединений.

Работа САД осуществляется в следующей последовательности:

1. Производятся пополнение РР подготовленным к работе клеевым составом до заданного постоянного для каждого рабочего цикла уровня ( $H_0 = \text{const}$ ), подключение технологических элементов ОУ к УУ и подача на него электро- и пневмопитания.

2. Задатчиком Зд при включенном положении тумблера  $\alpha 1$  настраивается давление  $p_3$ , величина которого, варьируемая в пределах 0,02...0,08 МПа (0,2...0,8 кгс/см<sup>2</sup>), контролируется по шкале МО и подбирается экспериментальным путем в зависимости от вязкости клеевого состава.

3. Производится настройка электронного таймера на требуемую величину времени дозирования, которая определяется экспериментальным путем и зависит от вязкости клеевого состава и заданной величины дозы.

4. При открытом положении вентиля В2 и закрытом положении вентиля В1 тумблером  $\alpha 2$  производится включение в работу РД и герметизация ИТ.

5. Набор давления в РР контролируется по МО при выключенном положении тумблера  $\alpha 1$ . По окончании переходного процесса набора давления (при  $p = p_3$ ) посредством многократного касания кнопки СК производится заполнение гидрокommunikаций ("проливка") ЛТ дозируемым составом до полного удаления из нее пузырей воздуха. При выполнении данной операции следует установить вспомогательную емкость под СН.

6. Дозирование жидкости ведется по команде оператора от кнопки СК.

7. Для выключения системы из работы следует закрыть вентиль В2, открыть вентиль В1 и после стравливания воздуха из РР выключить тумблер  $\alpha 2$ .

Рассмотренная система прошла стадию доводки и испытаний в лабораторных условиях. Фактически она подготовлена к промышленным испытаниям на машиностроительных предприятиях.

Реализованное в данной системе техническое решение по транспортировке и дозированию высоковязких клеевых составов под действием избыточного давления воздуха, создаваемого в замкнутом расходном резервуаре, и контролем расхода посредством преобразования последнего в давление газа в герметичной измерительной трубке может быть доработано и для дозирования пастообразных клеевых составов. Для этого расходный резервуар системы дозирования должен быть дополнительно оборудован системой автоматического подогрева и стабилизации температуры с целью уменьшения вязкости дозируемого состава, а линия его транспортировки должна быть теплоизолирована.

### Библиографический список

1. Безменов В.С., Ефремов В.А., Руднев В.В. Автоматизация процессов дозирования жидкостей в условиях малых производств. М.: ЛЕНАНД, 2010. 216 с.
2. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации ГСП. Универсальная система элементов промышленной пневмоавтоматики УСЭППА: каталог. 1975. Т. 5. Вып. 1. 44 с.
3. Сайт ООО НТФ "Техно-Альянс Электроникс". URL: <http://www.termopro.ru/katalog.php?id=25>
4. Сайт инженеринговой компании "AZcom Eurotech". URL: <http://www.azkom.ru/main.mhtml?Part=68>
5. Сайт компании "Дом компонентов и оборудования "Электроншик". URL: <http://www.domko.ru/news.php?id=828>
6. Сайт ООО НТФ "Техно-Альянс Электроникс". URL: <http://www.termopro.ru/katalog.php?id=13>
7. Сайт – справочник компаний GMStar. URL: <http://gmstar.ru/moscow/1-96553-sts-elektroniks.html>

УДК 658.562:621.9

**А.С. Горелов**, канд. техн. наук, **В.В. Прейс**, д-р техн. наук  
(Тулский государственный университет)  
E-mail: asgorelov@rambler.ru

## Управление качеством автоматизированной сборки многоэлементных изделий массового выпуска на основе статистических методов

*Рассмотрены вопросы применения статистических методов для решения задачи управления качеством автоматизированной сборки многоэлементных изделий, предусматривающих использование планов и методов непрерывного выборочного контроля, что позволяет обеспечить автоматизацию процедур контроля и требуемый уровень качества изделий.*

*Questions of application of statistical methods for the decision of a problem of quality management of the automated assemblage of the multielement products providing use of plans and methods of the continuous selective control that allows to provide automation of procedures of the control and a demanded degree of quality of products are considered.*

**Ключевые слова:** автоматизированная сборка, статистический метод, непрерывный выборочный контроль, план контроля.

**Keywords:** the automated assemblage, statistical method, the continuous selective control, the control plan.

Современное сборочное производство изделий массового выпуска характеризуется высокой степенью автоматизации, высокой производительностью и непрерывностью технологического процесса. Для управления качеством продукции в условиях таких производств требуются методы контроля с оперативной обратной связью.

Так, для сборки различных многоэлементных изделий массового выпуска используют автоматические роторные линии (АРЛ), производительность которых может составлять от 100 до 1000 шт./мин [3]. Качество собираемых изделий обеспечивается прежде всего высокими требованиями к надежности основных технологических систем АРЛ, реализуемыми конструктивными (например, путем резервирования систем автоматической загрузки элементов) и организационными методами (выбором оптимальной стратегии технического обслуживания АРЛ) [2].

Управление качеством автоматизированной сборки изделий осуществляется путем использования в их структуре АРЛ контрольных устройств и информационно-управляющей системы, обеспечивающих сплошной контроль наличия комплектующих элементов в потоке, управление системами автоматической загрузки (отказ от подачи последующего элемента), удаление некомплектных изделий из общего потока и т.п.

Тем не менее, вследствие ненадежной работы указанных устройств и систем АРЛ всегда существует реальная вероятность попадания в выходной поток некомплектных (бракованных) изделий. Поэтому важным элементом управления качеством сборки изделий массового выпуска остается непрерывный выборочный контроль комплектности изделий, базирующийся на применении статистических методов [1].

Традиционная схема непрерывного выборочного контроля представляет собой чередование периодов сплошных и выборочных проверок. При одностадийном контроле переход от сплошного контроля к выборочному осуществляется при условии успешной приемки подряд  $n$  изделий. Выборочный контроль проводится с частотой  $f$ , и при первом же появлении бракованного (некомплектного) изделия переходят к сплошному контролю. При многостадийном контроле используют несколько различных частот.

Следует отметить, что особенностью непрерывного выборочного контроля комплектности изделий при автоматизированной сборке является его разрушающий характер, исключающий возможность возврата собираемых элементов после контроля в общий технологический поток. Это требует минимизации объемов контрольных выборок.

Впервые модели планов непрерывного выборочного контроля CSP (*continuous sampling plan*) были предложены Доджем и Роумингом. Так, при использовании одностадийного плана CSP-1 контроль начинается со сплошной проверки изделий, начиная с первого выпускаемого изделия. Такая проверка производится до тех пор, пока через контрольный орган не пройдет подряд  $i$  годных изделий. После этого начинается выборочный контроль с частотой  $f$ , продолжающийся до тех пор, пока не будет обнаружено не-





комплектное изделие. Сразу возобновляется сплошная проверка, которая продолжается до тех пор, пока не будет выполнено требование прохождения через контрольный орган подряд  $i$  комплектных изделий.

Пусть вероятность обнаружения дефектного (некомплектного) изделия постоянна и равна  $q$ . В случае, когда дефектные изделия не заменяются годными, что характерно для автоматизированной сборки многоэлементных изделий массового выпуска, выражение для среднего выходного уровня дефектности примет вид:

$$q_{cp} = q \left[ 1 - \frac{1}{1 + (1-q)^{i-1} (f^{-1} - 1)} \right]. \quad (1)$$

Точка экстремума  $q_1$  функции (1) определится из условия

$$\frac{dq_{cp}}{dq} = 0, (1 - q_1)^i (f^{-1} - 1) - q_1 i + 1 = 0. \quad (2)$$

Предел среднего выходного уровня дефектности

$$q_L = \frac{q_1 (i + 1) - 1}{i}. \quad (3)$$

Чередование процедур выборочного и сплошного контроля при появлении брака приводит к тому, что контрольные устройства АРЛ будут работать с переменной производительностью.

Для устранения указанного недостатка были разработаны модели планов автоматизированного непрерывного выборочного контроля АССП (*automatic continuous sampling plan*). Эти планы позволяют проводить контроль ритмично, что значительно упрощает конструкции самих контрольных устройств и встраивание их в сборочные АРЛ. Например, при одностадийном плане АССП-1 контролируют каждое  $f^{-1}$  изделие. При этом текущая последовательность  $i$  изделий, выпущенных АРЛ, находится в накопителе. При появлении среди выборочно контролируемых изделий некомплектного объема накопителя уводится из потока на разбраковку, а АРЛ налаживается. В этом случае средний выходной уровень дефектности

$$q_{cp} = \frac{q - qf - iq^2 f}{1 - qf - iq^2 f}. \quad (4)$$

Так как при использовании плана в АРЛ изделия находятся в процессе непрерывного транспортирования, то в объем накопителя также могут быть включены изделия, подвергнутые автоматическому контролю, но находящиеся внутри группы из  $i$  накапливаемых изделий. Объем накопителя в таком случае равен  $(i - if - 1)$ .

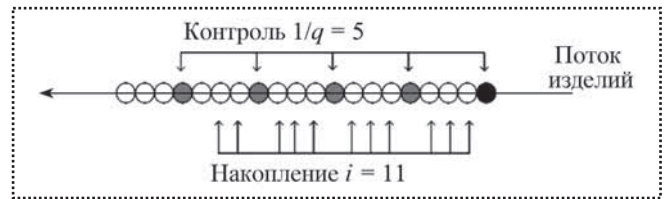


Рис. 1. Пример реализации плана АССП-1

Исследуем функцию (4) среднего выходного уровня дефектности:  $q_{cp} = 0$  при  $q = 0$  и  $q = \left( \frac{1}{f} - 1 \right) \frac{1}{i}$ .

Определим точку экстремума  $q_1$  функции (4):

$$\frac{dq_{cp}}{dq} = 0, q_1 = 1 - \sqrt{1 - \frac{1-f}{if}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) имеет решение при  $\frac{1-f}{if} \leq 1$ . Таким образом, условием существования экстремума будет  $i \geq \frac{1}{f} - 1$ .

Пример реализации плана АССП-1 в случае наличия входного уровня дефектности  $q = 0,2$  и параметров плана  $f = 0,25$  и  $i = 1$  приведен на рис. 1. Автоматически контролируется каждое четвертое изделие из технологического потока и происходит автоматическое накопление 11 изделий, которые в случае появления некомплектного изделия извлекаются из общего технологического потока и разбраковываются на стороне.

Сравним величину среднего объема выборки  $\bar{n}$ , используемого при реализации непрерывного выборочного контроля по планам CSP-1 и АССП-1. Средний объем выборки:

– для плана CSP-1:

$$\bar{n} = \frac{f}{f + (1-f)(1-q)^i} 100 \% ; \quad (6)$$

– для плана АССП-1:

$$\bar{n} = \frac{i + \frac{1}{q} - iq - 1}{\frac{1}{fq} - iq - 1} 100 \% . \quad (7)$$

Анализ зависимостей (6) и (7) показывает, что средний объем выборки  $\bar{n}$  при использовании плана АССП-1 меньше, чем в случае использования плана CSP-1. Сравнение значений предела среднего выходного уровня дефектности  $q_{cp}$  см. формулы (1) и (4), и точки его экстремума  $q_1$  см. формулы (2) и (5), для указанных планов показывает возможность обеспечения более низких значений предела среднего выход-

ного уровня дефектности  $q_{cp}$  при использовании плана АСРР-1.

Применение планов непрерывного выборочного контроля для решения задач управления качеством автоматизированной сборки многоэлементных изделий массового выпуска позволило предложить новый метод реализации автоматизированного статистического контроля. Целью метода является обеспечение предела среднего выходного уровня дефектности – см. формулу (3) – в результате непрерывного выборочного контроля и возможной разбраковки или отбраковки изделий по результатам контроля.

Поставленная цель достигается тем, что изделия для контроля с определенной частотой отбирают из технологического потока и производят накопление не проконтролированных изделий в накопителе, который располагают за устройством контроля. При обнаружении одного или нескольких дефектных изделий в устройстве контроля, изделия, содержащиеся в накопителе, выводят из потока для их отбраковки.

Объем накопителя превышает число изделий, изготовленных за период между выборочным контролем, причем выборочный контроль осуществляют несколькими одноименными или разноименными устройствами контроля с отдельными накопителями или общим накопителем.

Число  $n$  одноименных устройств контроля  $n = \Pi t_k$ , где  $\Pi$  – производительность сборочной линии;  $t_k$  – время контроля.

Если загрузка всех  $n$  устройств контроля из технологического потока осуществляется в одном месте, то фазовый сдвиг начала работы контрольных устройств составляет  $(\Pi f)^{-1}$ .

Если устройства контроля расположены вдоль потока (например, конвейера), то загрузка устройств контроля производится по мере приближения очередного  $f^{-1}$  изделия и фазовый сдвиг начала работы устройств контроля составляет  $(\Pi f)^{-1} \left( 1 + \frac{h_k}{h} \right)$ , где  $h_k$  –

шаг расположения устройств контроля;  $h$  – шаг изделий в технологическом потоке.

Поскольку требуется обеспечить контроль каждого  $f^{-1}$  изделия, то возможна привязка определенных позиций конвейера к конкретному устройству контроля. Для этого конвейер должен иметь число позиций, кратное  $nf^{-1}$ . В простейшем случае, при ручном съеме изделия для контроля, возможно визуальное обозначение этих позиций конвейера.

Кроме того, может быть осуществлен выборочный контроль по нескольким контролируемым параметрам, по каждому из которых должны быть обеспечены пределы среднего уровня дефектности в готовой продукции  $q_{L1}, q_{L2}, \dots, q_{Lk}$ . Это достигается выборочным контролем с частотами  $f_1, f_2, \dots, f_k$  и накоплением  $i_1, i_2, \dots, i_k$  не проконтролированных изделий. Устройства контроля и накопителя могут располагаться последовательно вдоль технологического потока или быть включены в технологический поток. В АРЛ несколько разноименных устройств контроля могут быть сконцентрированы в одном роторе.

На рис. 2, а показана схема реализации предложенного метода непрерывного выборочного контроля в поточной сборочной линии с использованием нескольких (например, трех) одноименных устройств контроля, расположенных на поворотном столе 1, при этом загрузка изделий осуществляется в одном месте.

На рис. 2, б изображена схема реализации предложенного метода непрерывного выборочного контроля в АРЛ с использованием нескольких (например, пяти) разноименных устройств контроля, расположенных в контрольном роторе 1.

Частота контроля в рассматриваемых примерах  $f = 0,2$ . Значение  $i$  задается для каждого параметра индивидуально информационно-управляющей системой сборочной линии (АРЛ).

Метод непрерывного выборочного контроля реализуется следующим образом. Изделия загружаются с конвейера 2 в соответствующие устройства контроля

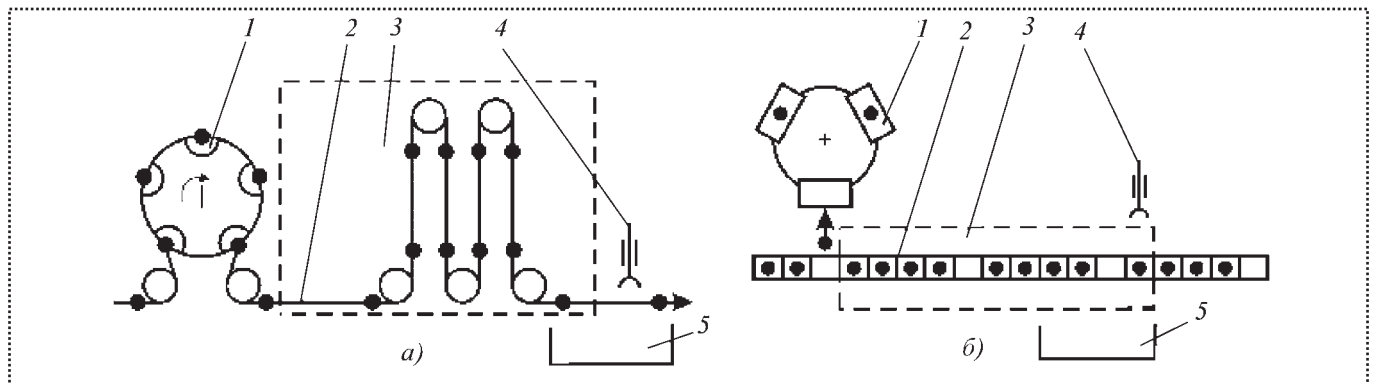


Рис. 2. Схемы реализации метода непрерывного выборочного контроля в поточной сборочной линии (а) и в автоматической роторной линии (б)



с частотой  $f$ . После проведения выборочного контроля в контрольных устройствах не проконтролированные изделия остаются внутри накопителя 3, который может являться как продолжением конвейера 2, так и отдельным транспортным элементом сборочной линии (АРЛ). При обнаружении дефектного изделия устройство 4 удаления изделий сбрасывает не проконтролированные изделия в устройство 5 хранения и разбраковки. Изделия в устройстве 5 проходят разбраковку с возвратом или без возврата годных изделий на конвейер 2 в соответствии с технологией контроля.

Использование предлагаемого метода для контроля качества сборки многоэлементных изделий позволяет обеспечить в контролируемой продукции ограничение уровня дефектности  $q_L$  до определенной величины, заложенной в требованиях потребителя.

Таким образом, применение статистических методов для решения задачи управления качеством авто-

матизированной сборки многоэлементных изделий, предусматривающих использование предлагаемых планов и методов непрерывного выборочного контроля, позволяет обеспечить автоматизацию процедур контроля и требуемый уровень качества изделий при минимизации объемов выборки.

#### Библиографический список

1. Горелов А.С. Автоматизация выборочного контроля изделий на роторных и роторно-конвейерных линиях // Вестник машиностроения. 2003. № 8. С. 46–51.
2. Преис В.В. Надежность автоматических роторно-конвейерных линий для сборки многоэлементных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 10. С. 17–22.
3. Роторные технологии, машины и линии на современном этапе промышленного развития / В.А. Быстров, Е.Н. Фролович, И.А. Клусов, В.В. Преис // Вестник машиностроения. 2003. № 10. С. 43–47.



## ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ: учеб. пособие

С.А., Федосов, И.Э., Оськин

125 с. ISBN 978-5-94275-570-6

Цена 250 р.

Даны основы теории сварки плавлением (теплофизика сварочных процессов, физика дугового разряда, основы металлургических процессов в варочной ванне, формирование зон термического влияния).

Приведена классификация видов сварки и сварных швов, рассмотрены технология и оборудование дуговой сварки, кратко описаны другие виды сварки (электроконтактная, газовая холодная сварка давлением, диффузионная в вакууме, сварка трением, электрошлаковая, плазменная, электронно-лучевая, лазерная, ультразвуковая, термитная), а также технологии и оборудование для огневой резки.

Уделено внимание механизмам образования сварочных дефектов, напряжений и деформаций, методам их предотвращения, методам контроля качества сварных швов, технике безопасности при сварочных работах.

Для студентов высших технических учебных заведений. Может быть полезна специалистам сварочного производства.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:  
по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru  
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

# В ПОМОЩЬ КОНСТРУКТОРУ, ТЕХНОЛОГУ

УДК 519.85

Ю.Н. Матросова, канд. техн. наук, Е.С. Малова, студентка 5-го курса  
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)  
E-mail: kandy2701@mail.ru

## Программное обеспечение для автоматизированного проектирования фрез

Разработано программное обеспечение для автоматизированного расчета конструктивных параметров и построения моделей и чертежей фасонных дисковых фрез.

Developed software for automated calculation of design parameters and construction models and drawings of resisting fitting cutters.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, фасонная дисковая фреза, червяк.

**Keywords:** software, resisting fitting cutter, screw.

В инструментальном производстве машиностроительных предприятий одной из задач автоматизации является разработка программного обеспечения для автоматизированного проектирования режущего инструмента. Одним из таких инструментов является дисковая фасонная фреза для обработки архимедова червяка, обладающая сложными геометрией и формой зубьев, поэтому автоматизированное проектирование фрезы является актуальной задачей.

Для реализации поставленной задачи был разработан алгоритм работы программы, представленный на рис. 1. После запуска программного обеспечения пользователю предоставляется возможность ввода параметров червяка и данных для расчета профиля, далее осуществляется программный расчет параметров фрезы, выбор необходимых стандартных значений для построения чертежа и модели. В случае, если расчет не возможен, либо введенные данные содержат недопустимые значения, пользователю выводится сообщение об ошибке и работа программы начинается заново, с ввода данных.

После успешного расчета данных открывается возможность вывода данных в виде отчета в MS WORD, а также вывода чертежа и модели инструмента в КОМПАС и технологического процесса по его изготовлению.

Программное обеспечение разработано в среде разработки Borland Delphi с использованием инстру-

ментальных средств разработки приложений (библиотек конструктивов, прикладных систем автоматизированного проектирования – САПР) на базе системы КОМПАС-3D. Для расчета были использованы стандартные библиотеки среды Delphi, включающие в себя математические, визуальные средства, стандартные компоненты.

На рисунках представлены: интерфейс программного обеспечения для автоматизированного расчета параметров, вывода расчета в виде отчета в MS Word (рис. 2); 3D модель (рис. 3) и чертеж (рис. 4) дисковой фасонной фрезы для архимедова червяка в САПР КОМПАС-3D.

Главное окно программы логически и визуально разделено на два блока: "Данные для расчета профиля" – слева и "Данные для построения модели и чертежа" – справа. В первый блок вводятся параметры, характеризующие архимедов червяк, за исключением

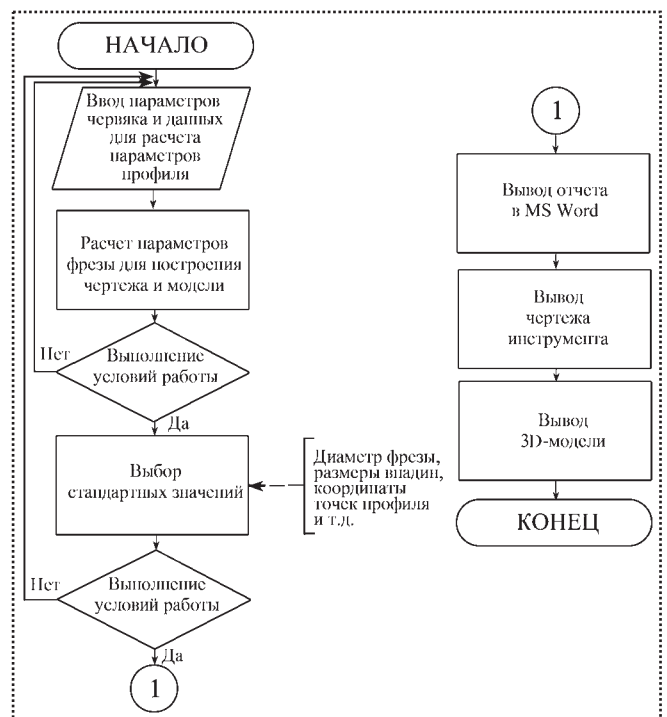


Рис. 1. Алгоритм программного обеспечения





Расчет дисковой фрезы для архимедова червяка

Экспорт | Справка

Данные для расчета профиля		Данные для построения модели и чертежа, мм	
Модуль: m= 10	Внутренний диаметр: Di= 76	Диаметр фрезы: D=130	Высота профиля: h0=25
Число заходов: n= 4	Угол давления: a= 20	Диаметр отверстия: d=32	Наибольшая высота: h=26
Наружный диаметр: De= 120	Угол подъема средней винтовой линии: b= 21° 48'	Число зубцов: z=10	Падение затылка: K=8
Делительный диаметр: d= 100	Осевая толщина витка: S= 15,41	Толщина зуба: C=20	Глубина канавки: H=28,5
[ Расчет ] [ > ]		Радиус закругления стружечной канавки: r=2,5 [ 3D модель ] [ Чертеж ]	

Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения

не устраивают пользователя можно произвести перерасчет данных, проделав все действия с самого начала.

При нажатии кнопки "3D модель" появляется модель фрезы в САПР КОМПАС-3D, а при нажатии кнопки "Чертеж" – чертеж инструмента. Кнопка "Создание отчета" поможет пользователю

модуля. Далее пользователь нажимает на кнопку "Расчет" и программа рассчитывает и выбирает из базы данных параметры, необходимые для построения чертежа и модели фрезы. После этого выбранные данные отображаются в правой блоке окна. Если они

отобразить все расчеты и пример построения чертежа в текстовом редакторе.

Таким образом, разработанное программное обеспечение автоматизированного проектиро-

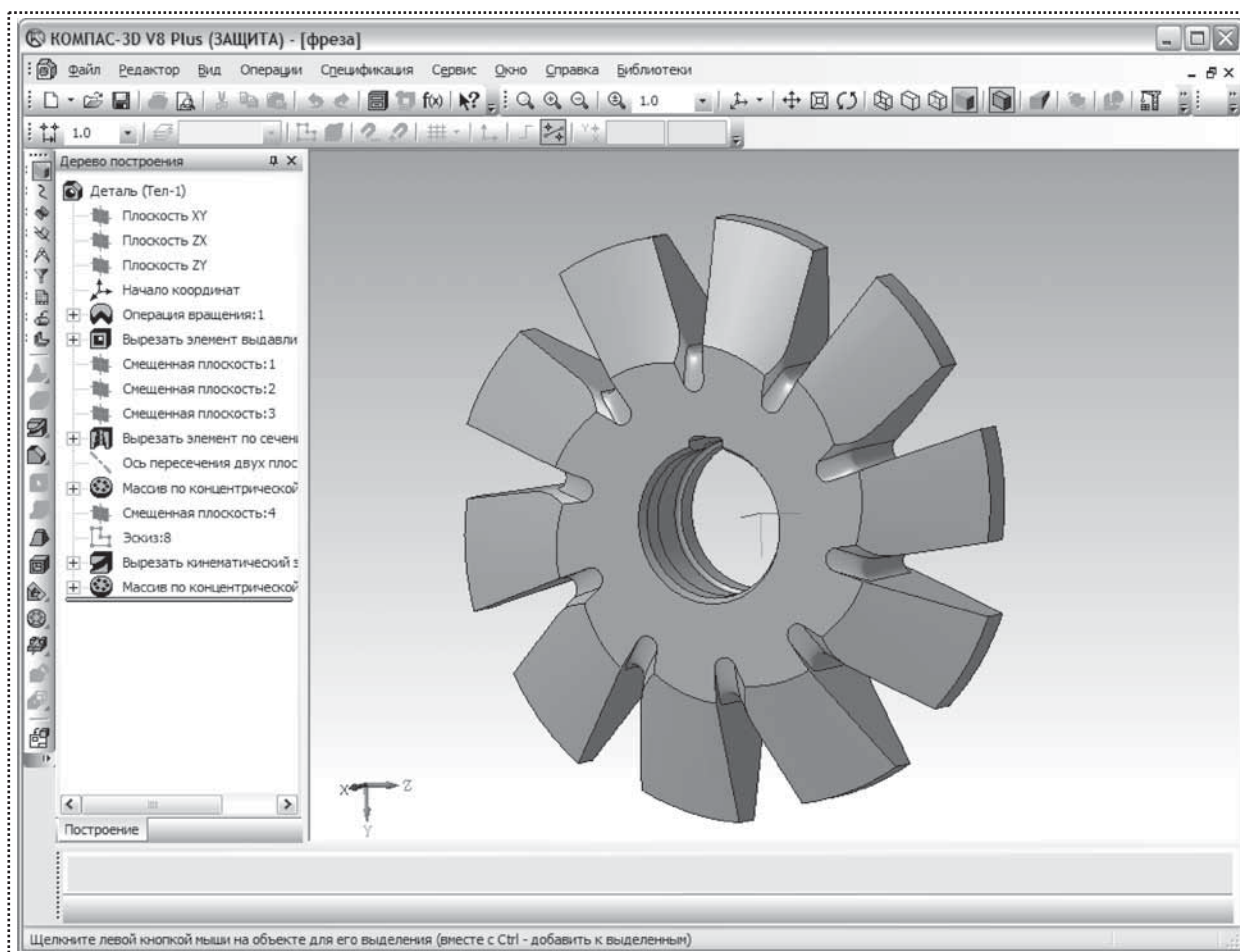


Рис. 3. 3D модель дисковой фасонной фрезы для обработки архимедова червяка

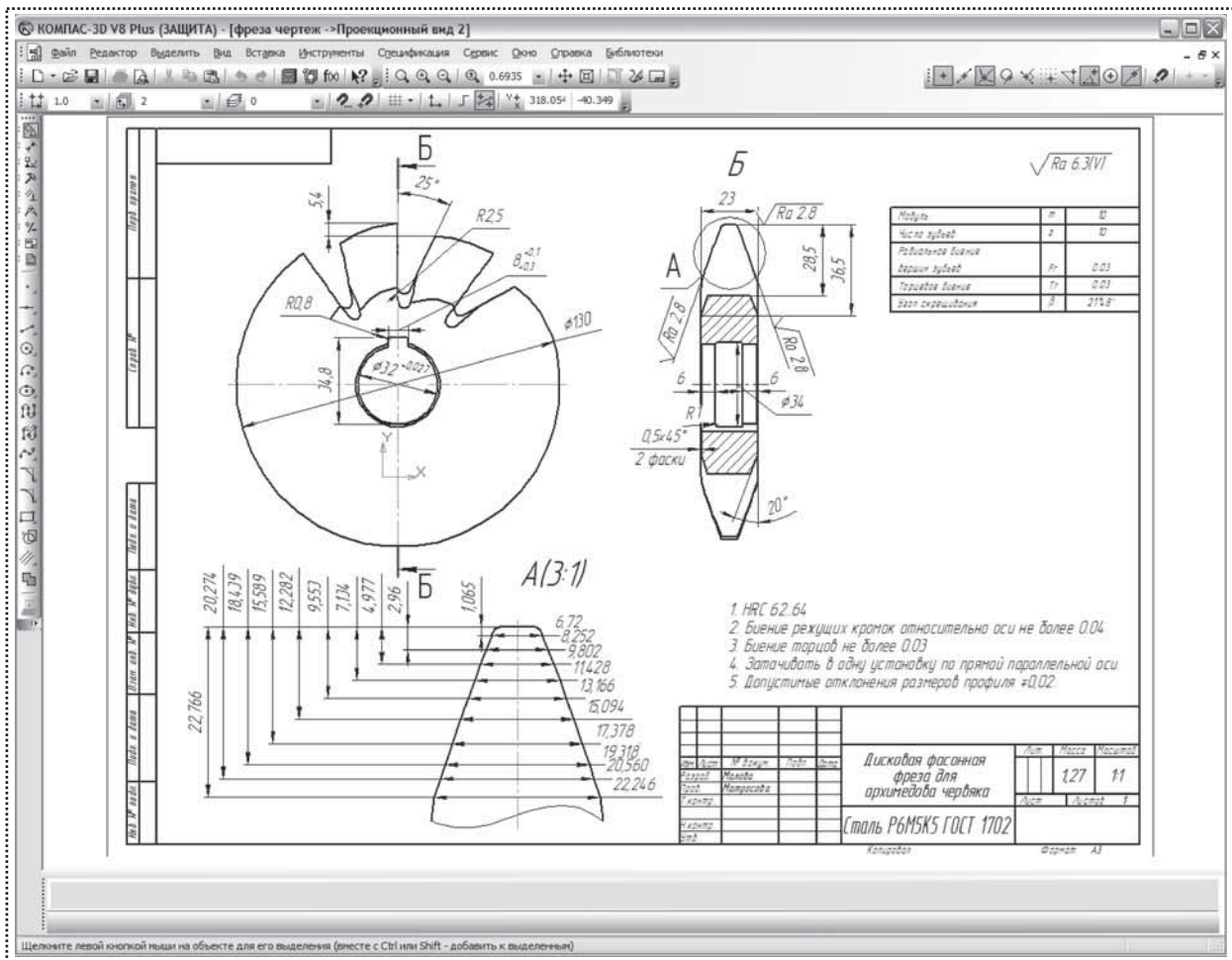


Рис. 4. Чертеж дисковой фасонной фрезы

вания дисковой фасонной фрезы для обработки архимедова червяка позволяет значительно сократить время проектирования инструмента и повысить уровень автоматизации процесса формирования конструкторской документации на изделие.

#### Библиографический список

1. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. М., 1963. 952 с.
2. Фрайфельд И.А. Расчет и конструирование специального металлорежущего инструмента. М., Л., 1959. 196 с.

## Указатель статей, опубликованных в 2011 году

	№		
<b>Экономика и организация сборочного производства</b>			
Коклѐнков Д.А. Организация системы сборки изделий на малом предприятии .....	3	Изнаилов Б.М., Изнаилов О.Б., Васин А.Н., Мукатова Г.Х. Вероятностное моделирование механизма сопряжения рабочих элементов силовых многозвенных механизмов в результате выполнения операции сборки..... 6 Изнаилов Б.М., Изнаилов О.Б., Васин А.Н., Мукатова Г.Х. Совершенствование технологического процесса сборки шариковых винтовых передач с целью повышения их грузоподъемности..... 4 Ковалѐв В.Г., Ковалѐв С.В. Применение расчетных параметров инструмента для совершенствования процесса электромотажа накруткой..... 3 Козырев Ю.Г. Установка захватных устройств и инструментов на конечном звене манипулятора при сборке изделий машиностроения и приборостроения..... 12 Коныгин С.Б. Стохастический метод оценки параметров деградации соединений конструктивных элементов..... 11 Крылов С.М., Богомолов Р.М., Носов Н.В., Дедов Н.И. Сборка секций бурового шарошечного долота..... 7 Леонов В.Н., Березин С.Я. Систематизация способов фрикционного стопорения соединений с крепежно-резьбообразующими деталями..... 8 Набатников Ю.Ф. Обеспечение заданного ресурса соединенных деталей машин..... 4 Матросова Ю.Н., Уколов А.А. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования протяжек..... 12 Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Формализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий..... 8 Сысоев С.Н., Еропова Е.В. Исследование граничных условий применения метода многократной коррекции положения сопрягаемых изделий..... 7 Филиппов В.В., Иванов А.В., Булавин И.А., Груздев А.Ю. Новые технологии, технологическая оснастка и оборудование для сборки редукторов ведущих мостов автомобилей..... 5 Шуваев В.Г., Папшев В.А., Анкудинов Д.В. Совершенствование технологии ультразвуковой запрессовки зубков шарошечных долот путем применения режима схватывания..... 5 Шуваев В.Г., Шуваев И.В. Инерционная ударно-импульсная затяжка резьбовых соединений с применением дополнительных ультразвуковых колебаний..... 7	
Крылатков П.П. Управление целостностью технологического процесса .....	10		
Лукина С.В. Оценка конкурентоспособности сборных металлорежущих инструментов на этапе их проектирования и выбора .....	9		
Русяева Т.О. Программа оптимизации материальных потоков на производственных участках механосборочного производства.....	1		
Шабайкович В.А. Сборочное производство машиностроения на современном этапе развития.....	12		
<b>Технологичность конструкции</b>			
Варганов М.В., Безручкин В.В., Дмитриева О.Г. Автоматизация процедур обеспечения и оценки эксплуатационной технологичности крупногабаритных изделий .....	10		
Кашуба Л.А. Реальная геометрия детали.....	8, 10		
<b>Сборочное оборудование и его элементы</b>			
Авцинов И.А., Дроботов А.В., Кристаль М.Г. Вибротранспортные устройства для автоматической сборки с переменным характером трения (сухое – жидкостное) на несущей поверхности.....	3		
Авцинов И.А., Кристаль М.Г. Условия всплываия деталей в пневмовакуумном вибротранспортном устройстве .....	4		
Божкова Л.В., Варганов М.В., Бакена Мбуа Ж.К. Приближенный способ определения моментов приводов, обеспечивающих требуемое движение звеньев сборочного устройства .....	4		
Данилова Л.Н. Устройства для установки саморезов .....	7		
Житников Ю.З., Житникова И.В. Анализ погрешностей моментов затяжки одношпindelными гайковертами на основе муфт предельного момента.....	8		
Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Обоснование параметров пружины для возвращения в исходное положение механизма схвата после срабатывания .....	1		
Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Устройство для сборки осесимметричных деталей на базе манипулятора с параллельными кинематическими цепями.....	8		
Лапынин Ю.Г., Макаренко А.Н., Архипов А.А. Универсальное оборудование для присоединения патрубков к аппаратам, находящимся под давлением.....	3		
<b>Современные технологии сборки</b>			
Абрамов И.В., Абрамов А.И., Синицын А.Н., Синицына В.В. Теоретическое обоснование новых способов сборки и разборки соединений с натягом.....	3		
Безъязычный В.Ф., Непомилуев В.В. Технология виртуальной сборки .....	5, 6		
Березин С.Я., Кулеш И.М. Влияние ультразвука на технологические параметры сборки соединений с крепежно-резьбообразующими деталями.....	7		
Голубев С.В., Павлин В.Н., Колесов В.А. Изготовление перегрузочных машин для АЭС с реакторами ВВЭР-1000.....	5		
Дроботов А.В., Кристаль М.Г. Повышение быстродействия и точности позиционирования пневматических поворотных столов.....	9		
Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Клычев А.А. Определение погрешностей относительного положения сопрягаемых поверхностей соединяемых деталей при роботизированной сборке.....	3		
Изнаилов Б.М., Васин А.Н., Изнаилов О.Б. Вероятностный анализ конструктивных параметров шариковой винтовой передачи, получаемых в результате сборки .....	8		
<b>Технологическая оснастка для сборки</b>			
Березин С.Я., Щербаков Е.В. Сборка и демонтаж резьбовых соединений с применением многорежимных вибрационно-активирующих устройств.....	5		
Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросова Ю.Н. Способ повышения точности моментов затяжки при сборке резьбовых соединений одношпindelными гайковертами ударного действия .....	9, 12		
Кристаль М.Г., Харькин О.С. Струйное устройство контроля и сортировки деталей для сборки .....	10		
Крутов А.В., Молодцов В.В. Влияние конструкции направляющих качения модульного типа на их эксплуатационные свойства .....	10		
<b>Сборочно-сварочные работы. Пайка</b>			
Быковский О.Г. Современное состояние и тенденции развития сварки цветных металлов и сплавов.....	10, 11		
Быковский О.Г. Современное состояние технологии сварки цветных металлов и сплавов.....	9		
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка в вакууме .....	4		
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка в газовых средах .....	2		
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Припой для пайки металлов.....	6, 9		
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Процессы взаимодействия металлов при пайке .....	11		
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Процессы формирования паяного шва .....	12		
Ковтунов А.И., Чермашенцева Т.В., Гладунок В.В. Исследование процессов аргодуговой сварки деталей, покрытых алюминием, с медной присадкой проволокой.....	1		





## Сборка с использованием клеев

Безменов В.С., Игнатов А.В. Принципы построения автоматизированных дозирующих устройств для нанесения клеевых композиций в процессах сборки в машиностроении..... 11

### Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П. Влияние параметров сборки бесконтактных уплотнительных устройств на герметичность шпиндельных узлов.....	4
Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П. Сборка прецизионных уплотнительных устройств с учетом податливости стыков.....	1
Березин С.Я., Курбатова Л.С. Техничко-экономический анализ вспомогательной оснастки для сборочных и резьбообразующих операций.....	2
Галиуллин Л.А., Зубков Е.В. Нейро-нечеткая настройка автоматизированной системы испытаний дизельных двигателей.....	7
Гольцов А.С., Кристалль М.Г., Кулагин Р.Н., Харькин О.С., Безрукова Т.В. Автоматизация измерения внутреннего диаметра длинномерных гильз гидроцилиндров.....	4
Горячев В.Н. Мониторинг и функциональная диагностика металлорежущих станков.....	7
Даньков А.М., Иоффе А.З. Балансировка деталей планетарной плавнорегулируемой передачи для трансмиссий транспортных средств.....	2
Жданов А.В. Обеспечение качества сборки роликовинтовых механизмов фрикционного типа.....	5
Ковалёв В.Г., Ковалёв С.В. Устранение дефектов при выполнении электромонтажа накруткой.....	1
Корчагин П.В., Казаков Ю.В. Сборка под сварку соединений тонкостенных оболочек с массивными деталями.....	1
Кулишенко С.А., Потемкин А.Н. Повышение качества сборки резьбовых соединений за счет изменения конструктивных параметров сборочного оборудования.....	7
Матросова Ю.Н. Устройство автоматизированного неразрушающего контроля физико-механических свойств изделий из пористых материалов перед сборкой.....	2
Назаров Ю.Ф., Руднева Л.Ю., Дубков М.П. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей с упругими свойствами при прецизионной сборке.....	4
Новиков А.А., Гафиятуллин А.А., Зубков Е.В., Макушин А.А. Имитационное моделирование испытания дизеля с системой подачи топлива Common Rail.....	8
Носков В.Н. Развитие функциональных возможностей систем управления моделированием технических объектов.....	3
Осинов К.Н. Выбор параметров для оценки технического состояния ДВС.....	2
Пашеева Т.Ю. Точность и стабильность технологических процессов – путь эффективного воздействия на качество изготовления сборочно-сварочных металлоконструкций.....	3
Плотников А.Л., Сергеев А.С., Крылов Е.Г., Кристалль М.Г., Заярный В.П. Автоматический контроль состояния сборного многолезвийного инструмента.....	3
Шишкарев М.П. Определение эксплуатационных характеристик предохранительных пружинно-кулачковых муфт.....	2

### Разборка. Ремонт

Казанцев В.Ф., Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С., Сундуков С.К. Влияние ультразвуковых радиальных колебаний на процесс разборки гладких соединений..... 1

Приходько В.М., Нигметзянов Р.И., Фатюхин Д.С. Совмещенный процесс ультразвуковой разборки и очистки деталей машин..... 5

### В помощь конструктору, технологу

Антонец И.В., Терешенок А.П. Исследование статических и динамических характеристик упругих чувствительных элементов кольцевого типа.....	6
Амиров Ф.Г. Общие положения создания переналаживаемых автоматических станочных систем.....	7
Арефьев И.В., Лапин И.Е., Стяжин В.Н., Савинов А.В., Лысак В.И., Полесский О.А. Моделирование тепловых процессов локальной электродуговой термообработки сварных соединений неплавящимся электродом.....	3
Безязычный В.Ф., Кононов В.А. Повышение эффективности и качества процесса создания изделий машиностроения посредством совершенствования форм его организации.....	12
Ильицкий В.Б., Евсеев А.С. Поводковые устройства для токарных многоцелевых станков.....	4
Коптев А.И., Кузовкин А.В., Титов А.В. Проектирование и изготовление сборных мелкомодульных долбяков с твердосплавной рабочей частью.....	1
Лазарчук В.С., Осетров В.Г. Способы реализации виртуальной сборки машин.....	11
Матросова Ю.Н., Андреев П.А. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования дискового зуборезного долбяка.....	6
Матросова Ю.Н., Краснов Е.С. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования приспособлений станков фрезерной группы в САПР "Компас-3D".....	8
Матросова Ю.Н., Храмова Е.И. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования приспособлений к станкам сверлильной группы в САПР "Компас-3D".....	4
Михрютин В.В. Математическое описание сборного режущего инструмента для моделирования процессов механической обработки.....	6
Мокрицкий Б.Я., Бурков А.А. Управление работоспособностью металлорежущего инструмента.....	7

### Подготовка специалистов

Подлеснов В.Н., Андросюк Е.Р., Кристалль М.Г. Формирование профессиональных компетенций у выпускников вузов..... 2

### Информация

Великович В.Б. Примеры автоматизации сборочных операций.....	8
Иванов А.Н. Высокие технологии XXI века – ВТ XXI–2011.....	9
Иванов А.Н. Международная выставка инструментов, оборудования, технологий MITEX–2010.....	6, 8
Иванов А.Н. Международная специализированная выставка "Оборудование, приборы и инструмент для металлообрабатывающей промышленности".....	10
Иванов А.Н. Металлообработка – 2010.....	2
Иванов А.Н. Металлургия – Литмаш 2010.....	5
Кристалль М.Г., Лунарски Е. 7-я Международная научно-техническая конференция "Техника и технология сборки машин" – ТТСМ-2011 (Жешув – Цисна).....	9
Указатель статей, опубликованных в 2010 году.....	1

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4  
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".

Адрес электронной почты издательства: [mashpubl@mashin.ru](mailto:mashpubl@mashin.ru);

редакции журнала: [sborka@mashin.ru](mailto:sborka@mashin.ru), <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.

Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 10.11.11 г. Подписано в печать 22.12.11 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,24. Заказ 6. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство **Машиностроение**".

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.