

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

4 2010  
(117)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Современные технологии сборки

Саблин П.А., Марьин Б.Н., Шпилев А.М. Методика увязки размеров при сборке изделий сложных форм . . . . . 3

#### Сборочное оборудование и его элементы

Надеждин И.В. Характерные динамические модели исполнительных механизмов транспортно-загрузочного оборудования автоматизированных сборочных производств . . . . . 9

#### Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Журавлев А.Н., Толоконников С.В., Дорбышев М.Г. Оценка влияния точности сборки на эксплуатационные параметры волновой зубчатой передачи . . . . . 16

Отений Я.Н., Ольштынский Н.В., Ольштынский С.Н., Щёголев Н.Г. Автоматизация оценки параметров зоны упругопластической деформации при обработке сопрягаемых поверхностей деталей . . . . . 21

Матросова Ю.Н. Программное обеспечение для автоматизированной обработки результатов контроля физико-механических свойств изделий из пористых материалов перед сборкой . . . . . 25

Ветрова Н.А., Хныкина С.В., Шашурин В.Д. К вопросу о прогнозировании качества смесителей радиосигналов на основе РТД на этапе их сборки . . . . . 30

Макушин А.А., Зубков Е.В., Новиков А.А. Оптимизация процесса испытания двигателей внутреннего сгорания . . . . . 38

Гориш А.В., Дунаевский В.П., Кириллов А.Б., Котов А.Н., Макаров Ю.Н. Анализ механизма управления интегрированным производственно-технологическим комплексом при конструировании и производстве систем информационно-измерительной техники . . . . . 43

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

#### Редакционный совет

<b>МОСКВА</b>	Ю.Г. КОЗЫРЕВ
А.С. ВАСИЛЬЕВ	А.И. КУМЕНКО
(главный редактор)	А.В. МЕДАРЬ
А.А. ГУСЕВ	Е.А. МИКРИН
М.В. ВАРТАНОВ	Ю.Ф. НАЗАРОВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ	В.В. ПОРОШИН
И.Н. ЖЕСТКОВА	Б.В. ШАНДРОВ
(зам. главного редактора)	А.А. ШАТИЛОВ
И.Н. ЗИНИНА	А.Г. ХОЛОДКОВА
Ю.Л. ИВАНОВ	Г.А. ЯРКОВ

#### Региональные редсоветы

<b>БЕЛГОРОД</b>	<b>ОРЕНБУРГ</b>
Н.А. ПЕЛИПЕНКО	А.Н. ПОЛЯКОВ
<b>БРЯНСК</b>	А.И. СЕРДЮК
О.А. ГОРЛЕНКО	А.П. ФОТ
<b>ВЛАДИВОСТОК</b>	<b>РЫБИНСК</b>
Ю.Н. КУЛЬЧИН	В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
А.А. СУПОНЯ	В.В. НЕПОМИЛУЕВ
В.М. КОРНИЕНКО	А.Н. СЕМЕНОВ
<b>ВОЛГОГРАД</b>	<b>САМАРА</b>
В.Г. КАРАБАНЬ	М.А. ЕВДОКИМОВ
М.Г. КРИСТАЛЬ	Ю.А. ВАШУКОВ
В.И. ЛЫСАК	Г.А. КУЛАКОВ
В.М. ТРУХАНОВ	В.А. НИКОЛАЕВ
<b>ИЖЕВСК</b>	<b>САНКТ-ПЕТЕРБУРГ</b>
И.В. АБРАМОВ	В.Ф. КУЗЬМИН
Б.А. ЯКИМОВИЧ	Е.В. ШАЛОБАЕВ
В.Г. ОСЕТРОВ	<b>ТОЛЬЯТТИ</b>
И.К. ПИЧУГИН	А.И. РЫЖКОВ
<b>КАЗАНЬ</b>	Б.Ф. ХАЗОВ
Р.И. АДГАМОВ	<b>ТУЛА</b>
<b>КОВРОВ</b>	В.В. ПРЕЙС
Ю.З. ЖИТНИКОВ	<b>ХАБАРОВСК</b>
<b>КОЛОМНА</b>	В.А. ЛАШКО
Ю.Д. АМИРОВ	<b>Украина</b>
<b>КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ</b>	<b>КИЕВ</b>
Б.Н. МАРЬИН	А.С. ЗЕНКИН
В.И. ШПОРТ	В.А. МАТИВЕНКО
А.М. ШПИЛЕВ	<b>ДОНЕЦК</b>
<b>НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ</b>	А.Н. МИХАЙЛОВ
С.В. ДМИТРИЕВ	<b>СЕВАСТОПОЛЬ</b>
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ	Е.Л. ПЕРВУХИНА
<b>НИЖНИЙ НОВГОРОД</b>	<b>Беларусь</b>
С.В. ГОЛУБЕВ	<b>МИНСК</b>
<b>ОМСК</b>	В.Л. БАСИНЮК
В.Н. КОСТЮКОВ	<b>ГОМЕЛЬ</b>
<b>ОРЕЛ</b>	В.Е. СТАРЖИНСКИЙ
Ю.С. СТЕПАНОВ	<b>ПОЛОЦК</b>
Г.А. ХАРЛАМОВ	М.Л. ХЕЙФЕЦ

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Н.М. КУЦ-ЖАРКО, Л.Д. ПАРШЕНКОВА

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; tsmm@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

4 2010  
(117)

### CONTENTS

#### Modern technologies in assembly

Sablin P.A., Maryin B.N., Shpilev A.M. Technique of coordination of the sizes  
at assembly products of difficult forms . . . . . 3

#### Production Tools and Machinery for Assembly

Nadezhdin I.V. Typical dynamic model of the executive mechanisms handling  
equipment automated assembly plants . . . . . 9

#### Quality assurance. Testing. Monitoring

Zhuravlev A.N., Tolokonnikov S.V., Dorbishev M.G. Estimation of influence  
of precision of assembly on operational parameters of the wave gear . . . . . 16

Oteny Y.N., Olshtinsky N.V., Olshtinsky S.N., Chegolev N.G. Automation  
of an estimations of parametres of a zone elastoplastic deformations at processing  
of adjoinable surfaces of details . . . . . 21

Matrossova Y.N. Software for automated data processing control results physical  
and mechanical properties of products from porous materials before assembly . . . . . 25

Vetrova N.A., Khnykina S.V., Shashurin V.D. About quality prediction of radio  
signals mixer based on RTD at the stage of their assembly . . . . . 30

Makushin A.A., Zubkov E.V., Novikov A.A. Optimization of testing process  
of internal combustion engines . . . . . 38

Gorich A.V., Dynaevsky V.P., Kirillov A.B., Kotov A.N., Makarov J.N. Analysis  
control mechanism integrated production-engineering assembly at designing  
and production systems of informative-measuring technique . . . . . 43

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: [sboraka@mashin.ru](mailto:sboraka@mashin.ru); [tmmm@mashin.ru](mailto:tmmm@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.

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

#### Editors

##### MOSCOW

VASIL'EV A.S.  
(Chief editor)  
VARTANOV M.V.  
DALSKY A.M.  
GUSEV A.A.  
ZHESTKOVA I.N.  
(Deputy chief editor)  
ZININA I.N.  
IVANOV YU.L.  
KOZYREV YU.G.

KUMENKO A.I.  
MEDAR' A.V.  
MIKRIN E.A.  
NAZAROV Yu.F.  
POROSHIN V.V.  
SHANDROV B.V.  
SHATILOV A.A.  
KHOLODKOVA A.G.  
YARKOV G.A.

#### Regional editors

##### BELGOROD

PELIPENKO N.A.

##### BRIANSK

GORLENKO O.A.

##### VLADIVOSTOK

KULSHIN Yu.N.  
SUPONIA A.A.  
KORNIENKO V.M.

##### VOLGOGRAD

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

##### IZNEVSK

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

##### KAZAN

ADGAMOV R.I.

##### KOVROV

ZHITNIKOV Yu.Z.

##### KOLOMNA

AMIROV Yu.D.

##### KOMSOMOLSK-ON-AMUR

MARJIN B.N.  
SCHPORT V.I.  
SHPILEV A.M.

##### NABEREZHNYE CHELNYY

DMITRIEV S.V.  
KHISAMUTDINOV R.M.

##### NIZHNY NOVGOROD

GOLUBEV S.V.

##### OMSK

KOSTIUKOV V.N.

##### OREL

STEPANOV Yu.S.  
KHARLAMOV G.A.

##### ORENBURG

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

##### RYBINSK

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

##### SAMARA

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

##### ST.-PETERSBURG

KUZMIN V.F.  
SHALOBAEV E.V.

##### TULA

PREYS V.V.

##### TOLIATI

KHAZOV B.F.  
RYZHKOVA A.I.

##### KHABAROVSK

LASHKO V.A.

Ukraine

##### KIEV

ZENKIN A.S.  
MATVIENKO V.A.

##### DONETSK

MIKHAILOV A.N.  
SEVASTOPOL  
PERVUKHINA E.L.

Belarus

##### MINSK

BASINJUK V.L.

##### GOMEL

STARZHINSKI V.E.

##### POLOTSK

KHEIFETZ M.L.

Executive editors of current issue:  
KUSH-ZHARKO N.M., PARSHENKOVA L.D.

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

УДК 621.88

П.А. Саблин, канд. техн. наук, Б.Н. Марьин, А.М. Шпилев, д-ра техн. наук  
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)

E-mail: ikpmto@knastu.ru

## Методика увязки размеров при сборке изделий сложных форм

*Представлены методы обеспечения точности и повышения производительности сборочных операций изделий сложных форм, обоснована актуальность современных методов сборки.*

*In article methods of maintenance of accuracy and increase of productivity of assembly operations of products of difficult forms are submitted. Questions of efficiency and a urgency of all submitted methods are considered. The advanced methods of assembly of products of difficult forms are submitted and their urgency is proved.*

**Ключевые слова:** объемная увязка, безплазовая увязка, плаз, шаблон, эталон.

**Key words:** volumetric coordination, without loft coordination, loft, a pattern, the model.

Особенностью современного агрегатно-сборочного производства является возрастающая сложность обводов и повышение требований к их качеству, в том числе к точности воспроизведения формы и размеров [1, 2]. В свою очередь, воспроизведение форм и размеров агрегатов и узлов характеризуется специфичностью используемых методов и средств. Можно выделить три группы методов увязки размеров:

- методы, базирующиеся на применении только жестких носителей форм и размеров;
- методы, базирующиеся, с одной стороны, на использовании аналитического описания поверхностей, а с другой — на применении конструктивных плазов и жестких носителей форм и размеров (шаблонов) для увязки элементов конструкции, не связанных с обводами изделия;

- методы, основанные на безплазовом изготовлении обводообразующей оснастки на базе аналитического (числового) задания всех геометрических параметров деталей и узлов изделия, в том числе с применением голографического принципа увязки информации.

В основе методов увязки первой и частично второй групп лежит плазово-шаблонный метод, включающий в себя две основные разновидности:

- *плазово-шаблонно-координатный метод*, основанный на использовании плоских первоисточников увязки размеров и универсальных плоских и пространственных координатных стенов. Увязка контуров различных элементов осуществляется посредством фиксирующих и базовых отверстий, выполненных на координатной сетке с ячейками 50×50 мм, т.е. применительно к методу сборки в приспособлениях, оснащенных рубильниками в качестве фиксаторов контуров обводов собираемого агрегата;

- *плазово-шаблонно-эталонный метод*, основанный на применении пространственных первоисточников увязки размеров, таких как эталоны поверхности, базовые эталоны. При этом базой увязки контуров оснастки является поверхность эталона. Этот метод применяется главным образом для воспроизведения форм и размеров агрегатов легких самолетов. Формирование контура агрегата осуществляется рубильниками, установленными по эталону поверхности.

В процессе технологической подготовки производства современных изделий, как правило, применяются одновременно несколько



методов увязки размеров. Наиболее известны в настоящее время методы: плазово-шаблонный, эталонно-шаблонный, объемной увязки и бесплазовой увязки.

### Плазово-шаблонный метод

В его основе лежит соответствие форм и размеров сопрягаемых элементов конструкции изделия [3]. Для всех сопрягаемых элементов создается единый эталон внешних форм и размеров изделия (узла, агрегата, изделия в целом) в виде теоретического плаза, представляющего собой чертеж изделия в натуральном масштабе со всеми проекциями и сечениями, позволяющими воспроизвести объемные формы.

При изготовлении технологической и контрольной оснастки используют жесткие носители форм и размеров изделия — плоские металлические шаблоны, скопированные по отдельным сечениям с плаза. Так как размеры на чертежах изделия ориентировочные, всю увязку размеров сопрягаемых элементов делают только по плазам и шаблонам.

Иными словами, операции построения поверхностей включают в число общих этапов процесса воспроизведения размеров элементов конструкции, при этом устраняется влияние погрешностей малоточных операций на точность взаимной увязки воспроизводимых размеров. В результате обеспечивается высокая точность взаимной увязки сопрягаемых элементов конструкции несмотря на сравнительно невысокую точность их размеров. Таким образом, плазово-шаблонный метод позволяет получить взаимозаменяемые агрегаты и детали изделий.

Для плазово-шаблонного метода характерны следующие особенности:

- строгая координация технологической подготовки заготовительно-штамповочных и сборочных работ при разработке процессов планирования и изготовления технологической и контрольно-эталонной оснастки;

- единая система внесения изменений в технологические процессы изготовления дета-

лей и сборки узлов и агрегатов, а также в применяемую для этой цели оснастку;

- централизованная система учета и хранения плазово-шаблонной оснастки.

Плаз является носителем геометрической информации о поверхностях и обводах изделий. Он используется как контрольный элемент производства при ориентировочной визуальной оценке правильности решения геометрических задач с помощью ряда программно-аппаратных средств.

Плаз применяется для тиражирования геометрии локальных зон агрегата, в том числе для вычерчивания отдельных сечений с целью изготовления шаблонов и обводообразующей оснастки, а также для решения ряда технологических задач, характер которых определяется типом производства и видом изделия.

Обеспечение высокой точности при решении этих задач обусловлено сложностью современных изделий и высокими требованиями, предъявляемыми к ним. Эта точность, в свою очередь, зависит, прежде всего, от точности и однозначности задания геометрических данных объекта, т.е. от точности как отображения плазом сконструированной поверхности, так и решения геометро-технологических задач конкретными исполнителями.

Таким образом, обеспечение точности и однозначности задания геометрии объекта является одним из основных требований, предъявляемых к плазовому производству. Другое основное требование — обеспечение точности и однозначности решения геометро-технологических задач совпадения результатов при тиражировании этих решений. Для этих задач вместо графической или графоаналитической модели (т.е. вместо чертежа) строят математическую модель объекта, хранящуюся в памяти ЭВМ в виде набора параметров и алгоритмов. Эта модель в дальнейшем однозначно отображает рассматриваемую поверхность и является основным документом плазового производства. Решение геометро-технологических задач выполняется на ЭВМ с применением стандартных программ.





### Эталонно-шаблонный метод

Низкая точность плазово-шаблонного метода и сложность пространственной увязки оснастки обусловили разработку и внедрение в производство малогабаритных изделий эталонно-шаблонного метода [3]. При его использовании основным источником увязки служат эталоны поверхностей агрегатов, включая разъемы.

В результате длительного промышленного применения были выявлены следующие недостатки эталонно-шаблонного метода:

- увеличенные сроки запуска и серийного освоения новых изделий;
- невозможность проведения точностной оценки увязки деталей;
- выявление и погашение рассогласований возможны только в ходе сборки первых серий;
- выпуск серийной документации возможен только после сборки первых серий и т.д.

Кроме того, в условиях роста темпов производства было установлено, что эталонно-шаблонный метод сдерживает сроки подготовки производства, не позволяет обеспечить широкий фронт работ. Также выявлены недостатки этого метода при увязке оснастки по шаблонам нескольких сечений, т.е. в продольном направлении (например, при изготовлении пуансонов для обтяжки обшивки). Устранению указанных недостатков способствовало применение инструментальных стендов и монтажных эталонов.

### Метод объемной увязки

Этот метод позволил значительно усовершенствовать систему разработки и выпуска серийной технической документации, систему и средства технологической подготовки производства, организацию запуска и серийного освоения новых изделий [3].

Использование макетов (эталонов) позволяет осуществлять пространственную увязку формы и размеров путем копирования, причем с более высокой степенью точности, чем при плазово-шаблонном методе. Применение метода объемной увязки способствовало соз-

данию необходимых новых и объединению отдельных разрозненных технологических цепей в общую замкнутую согласованную технологическую цепь увязки деталей изделия и элементов систем оборудования, а также средств для объективной оценки степени увязки.

Все это было достигнуто посредством совмещения этапов подготовки производства и отработки изделий на объемном плазе. Особенно большая роль отводится увязке на объемном плазе отдельных частей систем, так как в современном производстве велика трудоемкость монтажных работ систем, требующих большого объема ручных работ. Использование объемных плазов позволяет более точно взаимно увязывать не только элементы конструкции изделия, но и оборудования.

При методе объемной увязки используются эталоны поверхности и их комбинирование, шаблоны по схемам чертежной оснастки, плаз-кондукторы, координатно-инструментальные стенды, монтажные эталоны, объемные плазы как основное средство увязки, мастер-плиты, калибры, макеты узлов, обрабатываемых на объемном плазе или сборочной оснастке.

Объемно-конструктивно-технологическая отработка монтажей заключается в создании эталонных монтажей, обеспечивающих высокую надежность работы систем с первого изделия. Эталонный монтаж на объемном плазе выполняется при проведении следующих работ:

- проверке в реальных условиях конструктивной компоновки агрегатов и систем;
- определении наиболее эффективных вариантов их взаимного расположения;
- проверке функционирования всей системы;
- создании эталонной укладки трубопроводов и жгутов и их крепежа;
- создании эталонов труб и жгутов и других элементов коммуникации;
- корректировке чертежей по результатам отработки монтажей;
- определении места сборочных отверстий для крепления панелей уголков и отстыковки



оснастки, определяющей положение агрегатов, штуцеров и выводов трубопроводов.

На объемном плазе можно обрабатывать и испытывать гидросистемы, системы наддува, кондиционирования, кислородные электро-системы управления изделием и др. При использовании метода объемной увязки проводят дополнительную увязку оснастки с помощью базовых и сборочных отверстий. Базовые отверстия имеются в оснастке всех видов и расположены непосредственно на обводах в местах, соответствующих местам установки на агрегате изделия заклепок, соединяющих обшивку с каркасом.

Фиксирование по базовым отверстиям используют при монтаже и проверке оснастки, а также в процессе сборки узлов и агрегатов изделия. Увязку сборочных отверстий для обводных деталей проводят через образцовые обшивки и образцовые детали каркаса (для плоских деталей — по шаблонам). Сборочные отверстия выбирают из числа отверстий, входящих в конструктивные соединения деталей (заклепочный или болтовой шов).

Иногда в качестве сборочных отверстий используют другие отверстия, например, уже имеющиеся на деталях технологические. Увязку частей изделия и расположение на них отверстий осуществляют многократным последовательным копированием соответствующих размеров с какого-либо одного первоисточника увязки на различные виды оснастки, а затем уже на детали. Естественно, последовательный перенос вносит дополнительные погрешности.

Для агрегатов изделий легкого класса клепаной конструкции со сложными формами используют объемный плаз в виде замкнутой поверхности с кессонным каркасом. Для изделий легкого класса, имеющих в конструкции монолитные панели, объемный плаз может представлять собой набор рубильников, связанных в секции, с достаточным числом фиксирующих и прижимных элементов для установки панелей в обводе. Для изделий, в конструкции которых клепаные панели сочетаются с монолитными, объемные плазы могут иметь

комбинированную конструкцию: вблизи монолитных панелей — рубильники (по наружному контуру), клепаных панелей — "корки".

Обтяжные пуансоны изготавливают по контрольным слепкам с эталона поверхности (базового эталона) с последующим их использованием как контрольных плазов. Обводные детали, имеющие сложное строение сопрягаемых поверхностей, изготавливают по слепкам, снятым с эталона поверхности (базового эталона). Узловую сборочную оснастку монтируют по шаблонам и мастер-плитам. Элементы обвода изготавливают непосредственно по эталонам поверхностей (базовым эталонам). Изготовление оснастки, деталей, узлов, агрегатов и монтажных работ планируют в соответствии с основным графиком подготовки производства и запуска изделия в серийное производство.

При проектировании эталонов поверхностей и объемных плазов необходимо учитывать следующие требования:

- каркасы должны быть жесткими, исключая прогиб от собственной массы и монтажных нагрузок;

- допускаемые отклонения рабочего контура по основным сечениям эталонов поверхностей и объемного плаза от контура шаблона должны быть в пределах  $\pm 0,15$  мм;

- членение объемного плаза нужно выполнять по возможности согласно технологическому членению агрегатов на панели;

- необходимо обеспечение доступов и подходов для работы в объемном плазе.

Внедрение в производство метода объемной увязки на базе объемного плаза позволило повысить точность увязки как деталей каркаса, так и монтажей. Вместе с тем следует отметить и недостатки этого метода. Так, в конструкции объемных плазов не учтено панелирование агрегатов, вследствие чего затруднены сборка изделия и отработка монтажей по подборокам в последовательности сборки по директивному технологическому процессу. Работы, выполняемые при использовании метода объемной увязки на базе объемного плаза, имеют сравнительно длительный цикл. Кроме того,



затруднены подходы для работы на объемном плазме, что при внедрении конструктивных изменений вызывает необходимость проведения монтажных работ.

### Метод бесплазмовой увязки

Основным направлением в области совершенствования технологической подготовки производства является создание автоматизированных систем на базе развития аппарата математического моделирования объектов и процессов производства с использованием современных средств вычислительной техники и оборудования с ЧПУ. Это означает переход от связанного (зависимого) изготовления деталей к независимому, воспроизводящему объекты с заданной степенью точности, достаточной для обеспечения взаимозаменяемости.

Вместе с тем при переходе на независимый метод изготовления деталей возникает ряд проблем, от решения которых зависит успешное решение вопросов автоматизации технологии, например:

- создание широко развитого гибкого аппарата математического моделирования поверхностей изделий, который позволял бы проводить все необходимые расчеты как на этапе проектирования, так и при технологической проработке изделий;
- разработка математического обеспечения и программ для проектирования и воспроизведения объектов практически любой сложности;
- разработка высокоавтоматизированных систем для создания соответствующих программ.

В настоящее время появились методы, позволяющие описывать подавляющее большинство различных вариантов поверхностей. Такие методы применяют при конструировании сложных поверхностей изделий. Большое разнообразие методов позволяет в значительной степени автоматизировать процессы конструирования поверхностей.

Широкое распространение аналитических методов задания обводов, автоматизация рас-

четов и записи программ для оборудования с ЧПУ способствовали разработке независимого метода образования форм и размеров сопрягаемых элементов конструкции – метода бесплазмовой увязки конструктивных элементов изделия.

Увязка размеров в этом случае осуществляется с помощью математической модели поверхности, полученной расчетным путем. Образование взаимосвязанных рабочих контуров технологической оснастки обеспечивается точным изготовлением ее на станках с ЧПУ. Точность увязки сопрягаемых элементов конструкции находится в прямой зависимости от точности их изготовления.

При переходе на метод бесплазмовой увязки изготовление производственной оснастки может осуществляться непосредственно на станках с ЧПУ, что резко сокращает номенклатуру увязочной оснастки. По назначению увязочная оснастка подразделяется на первоисточники информации об обводах агрегата, контрольно-эталонную оснастку, средства для увязки и изготовления производственной оснастки и монтажную оснастку.

Таким образом, метод бесплазмовой увязки базируется на использовании принципов независимого изготовления деталей, математического моделирования поверхностей, а также построения управляющей информации, не зависящих от применения методов проектирования обводов изделий.

Специальные средства увязки заготовительной и сборочной оснастки заменяются координатографами и фрезерными станками с ЧПУ в сочетании с плаз-кондукторами, инструментальными стендами и оптико-механическими средствами монтажа и контроля стапельно-сборочной оснастки.

Образование взаимоувязанных рабочих контуров оснастки обеспечивается точными координатными плоскими (двухкоординатными) и пространственными (трехкоординатными и более) системами станков с ЧПУ, изготовленными на базе отработанной системы допусков и посадок. Это позволяет использо-



вать при обработке оснастки на станках с ЧПУ стандартную координатную сетку (50×50 мм) базовых отверстий, которые обеспечивают взаимную увязку контуров оснастки. Эти же отверстия, перенесенные на детали, служат технологическими базами при сборке узлов и агрегатов координатными методами.

Станки с ЧПУ в сочетании с плаз-кондукторами объединяют в себе одновременно средство изготовления и средство увязки оснастки. При этом увязка контуров обеспечивается точностью изготовления оснастки на станках с ЧПУ. При использовании метода бесплазовой увязки оснастки требуется обязательное задание поверхностей агрегатов изделий типовыми аналитическими методами.

Сущность бесплазowego метода изготовления и метода бесплазовой увязки заготовительной и сборочной оснастки заключается в том, что с помощью системы исходных числовых данных о геометрических формах и размерах обводов изделия, рассчитанных на ЭВМ, выдерживают заданные допуски при расчетах, вычерчивании плазовых линий, изготовлении контуров оснастки и обрабатываемых изделий.

Благодаря применению универсальных средств с ЧПУ метод бесплазовой увязки оснастки позволяет [3]:

- сократить почти в 10 раз цикл и трудоемкость изготовления элементов некоторых видов оснастки, связанных с обводами;
- избежать изготовления при запуске изделия большого числа специальных средств увязки;
- расширить фронт работ;
- повысить точность изготовления и увязки оснастки;
- объединить разрозненные цепи изготовления и сборки деталей, узлов и агрегатов пла-

нера на единой расчетно-координатной основе;

- создать предпосылки для унификации технологических процессов изготовления оснастки;

- создать в сфере подготовки производства систему расчета и записи управляющих программ для всего оборудования с ЧПУ.

Заготовительная и сборочная оснастка, связанная с теоретическими контурами изделий, разделяется по координатному принципу на плоскую оснастку с рабочим контуром, имеющим постоянную или переменную малку, и объемную оснастку с поверхностями одинарной или двойной кривизны.

Так как внешние обводы изделий задаются аналитически, применение метода и средств бесплазовой увязки распространяется на элементы оснастки, связанные с теоретическими контурами изделий. Контроль геометрических параметров обводообразующей оснастки осуществляется различными методами с применением различных средств контроля.

### Вывод

*В статье сделан обзор методов, применяемых в настоящее время при сборке изделий сложных форм.*

### Библиографический список

1. **Современные** технологии авиастроения / Коллектив авторов; под ред. А.Г. Братухина, Ю.Л. Иванова. – М.: Машиностроение, 1999. 832 с.
2. **Крысин В.Н.** Технологическая подготовка авиационного производства. – М.: Машиностроение, 1984. 200 с.
3. **Современные** технологии агрегатно-сборочного производства самолетов / А.И. Пекарш, Ю.М. Тарасов, Б.Н. Марьин и др. – М.: Аграф-пресс, 2006. 304 с.



# СБОРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ЕГО ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.865.8-113: 621.531.3

**И.В. Надеждин**, д-р техн. наук (Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)  
E-mail: nadezhdin@rgata.ru

## Характерные динамические модели исполнительных механизмов транспортно-загрузочного оборудования автоматизированных сборочных производств

Приведены обобщенные динамические модели приводов сборочных машин-автоматов и мехатронных систем с электро- и пневмоприводом. Представлены результаты моделирования динамики многопозиционных сборочных автоматов и манипуляторов, отличающихся законами движения передаточных механизмов. Рассмотрена специализированная система автоматизированного моделирования динамики механизмов позиционирования сборочных машин-автоматов и мехатронных устройств.

The paper presents the dynamic model drives the assembly of automatic machines and mechatronic systems with electric and pneumatic. The results of computer simulation of dynamic multiposition assembly machines and manipulators with differing laws of motion transfer mechanisms are given in the text. The specialized computer-aided modeling of the dynamics of mechanisms positioning assembly of automatic machines and mechatronic devices is described.

**Ключевые слова:** автоматизированная сборка, исполнительные механизмы, транспортно-загрузочное оборудование, динамические модели.

**Key words:** automated assembling, executive mechanisms, handling equipment, dynamic models.

Для современного отечественного и зарубежного машиностроения характерны тенденции к повышению производительности машин за счет увеличения быстродействия и быстроходности, совершенствования динамических качеств путем сокращения времени переходных процессов. С другой стороны, повышаются требования к точности, экономичности и надежности машин. Удовлетворение столь проти-

воречивых требований возможно только при более глубоком и тщательном анализе протекающих в машине динамических процессов. Усложнение задач динамики сборочных машин-автоматов предъявляет повышенные требования к уровню динамических расчетов.

Приводы исполнительных механизмов в автоматизированных сборочных системах представляют собой машинный агрегат, в состав которого входят электро- или пневмодвигатель и передаточные механизмы, кинематически связанные с поворотным ротором многопозиционного сборочного автомата. Динамика таких систем определяется рядом факторов: реальным законом движения исполнительного звена, характеристиками упругодиссипативных связей привода и ведомых звеньев системы [1].

Обобщенная динамическая модель (рис. 1, а) привода сборочных машин-автоматов и мехатронных систем с электроприводом в первом приближении может быть представлена в виде двухмассовой системы, содержащей ведущую и ведомые подсистемы. Обозначения на рис. 1:

$q_i$  – обобщенные координаты;

$P$  – функция положения ведомого звена;

$I_0 = (I_p + I_m) i_{пр}^2$  – приведенный к валу ведущего звена момент инерции  $I_p$  ротора электродвигателя и  $I_m$  масс, закрепленных на валу ротора;

$i_{пр}$  – передаточное отношение привода;

$I_2$  – приведенный к валу ведомого звена момент инерции ведомых масс;

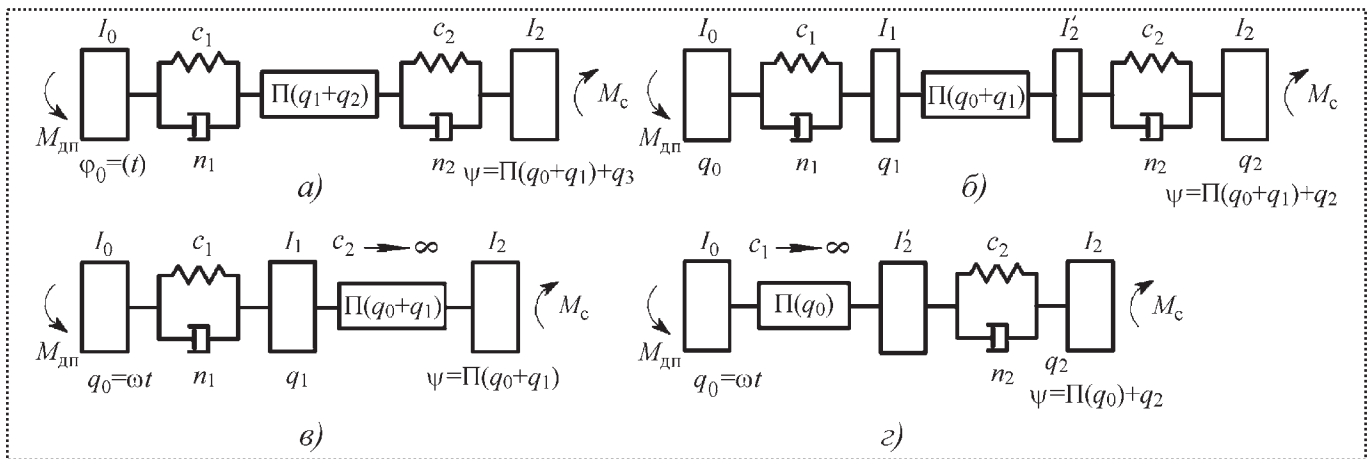


Рис. 1. Типовые динамические модели исполнительных механизмов сборочных машин-автоматов и мехатронных систем

$M_{дп} = M_{дiпр}$  – приведенный момент движущих сил;

$M_{д}$  – момент движущих сил на валу ротора электродвигателя;

$c_1, c_2, n_1, n_2$  – приведенные жесткости и коэффициенты диссипации энергии ведущей и ведомой подсистем;

$M_c$  – момент статических сопротивлений перемещению ведомой массы.

Динамическая модель привода исполнительных механизмов, включающая динамическую характеристику электродвигателя, описывается системой дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных параметрах:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= \rho \alpha_2 (2n_2 \dot{q}_3 + k_2^2 q_3) + M_{дп} I_0^{-1}; \\ \ddot{q}_3 + 2n_2 \dot{q}_3 + k_2^2 q_3 &= \\ &= -M_{сг} \omega_{ср}^2 - \beta_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 - \alpha_2 (\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2); \quad (1) \\ 2n_1 \dot{q}_2 + \rho k_1^{-1} k_2^2 q_2 &= \alpha_2 \rho (2n_2 \dot{q}_3 + k_2^2 q_3); \\ M_{дп} &= f(\dot{q}_1, \dot{M}_{д}, v_{д}, \tau_{д}, \omega_0) i_{пр}, \end{aligned}$$

где  $\rho = I_2/I_1$ ;  $k_1 = c_2/c_1$ ;  $k_2 = \sqrt{c_2/I_2}$ ;

$$M_{сг} = M_c / (I_2 \omega_{ср}^2);$$

$\omega_{ср}$  – средняя угловая скорость ведущего звена;

$\alpha_2 = \omega_i + \varepsilon_i q_2$ ;  $\beta_2 = \varepsilon_i + j_i q_2$ , здесь  $\omega_i = \omega_i(q_1)$ ,  $\varepsilon_i = \varepsilon_i(q_1)$ ,  $j_i = j_i(q_1)$  – инварианты подобия угловой скорости, ускорения и пульса исполнительного звена;

$v_{д}$  – коэффициент крутизны статической характеристики;

$\tau_{д}$  – электромагнитная постоянная времени;

$\omega_0$  – угловая скорость идеального холостого хода для электродвигателя постоянного тока или асинхронная скорость для асинхронного двигателя.

Оценка динамики исполнительных механизмов сборочных машин-автоматов без учета динамических характеристик электродвигателя может быть выполнена по математической модели, изображенной на рис. 1, б. Соответствующая система уравнений для данной модели имеет вид:

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 (1 + \rho' \alpha_1^2) + 2\dot{q}_1 (n_1 + \rho' \alpha_1 \beta_1 \omega) + k_3^2 q_1 &= \\ &= -\alpha_1 \omega^2 [\rho' \beta_1 + \rho (M_{сг} + \dot{q}_2^2 \omega^{-2})]; \quad (2) \\ \ddot{q}_2 + 2n_2 \dot{q}_2 + k_2^2 q_2 &= -M_{сг} \omega^2 - \beta_1 (\omega + \dot{q}_1)^2 - \alpha_1 \ddot{q}_1, \end{aligned}$$

где  $q_0 = \omega t$ ;  $\rho' = I_2 + I_2'$ ;

$$k_3 = \sqrt{c_1/I_1};$$

$I_1$  – приведенный момент инерции масс, упруго связанных с ротором электродвигателя;

$I_2$  и  $I_2'$  – приведенные моменты инерции ведомых звеньев исполнительного механизма и



транспортного органа, упруго связанных между собой;

$$\alpha_1 = \omega_i + \varepsilon_i q_1;$$

$$\beta_1 = \varepsilon_i + j_i q_1;$$

$\omega_i = \omega_i(\omega t)$ ;  $\varepsilon_i = \varepsilon_i(\omega t)$ ;  $j_i = j_i(\omega t)$  ( $0 \leq \omega t \leq 2\pi k_\tau$ ) – функции, характеризующие законы движения исполнительных механизмов сборочных машин-автоматов и мехатронных систем;

$k_\tau$  – относительная продолжительность движения исполнительного звена механизма.

В зависимости от соотношения жесткостей подсистем, характерных для данного класса автоматических сборочных устройств, из обобщенных моделей получены описания динамики, соответствующие  $c_2 \gg c_1$  (рис. 1, в) и  $c_1 \gg c_2$  (рис. 1, г). Из анализа динамических параметров систем привода сборочных машин-автоматов следует, что для поворотных роторов многопозиционных сборочных автоматов обычно  $c_2 \gg c_1$ . Для модулей сборочных мехатронных систем – манипуляторов, кантователей, питателей и ориентирующих устройств  $c_1 \gg c_2$ .

Дифференциальное уравнение движения ведомой системы для динамической модели механизма по рис. 1, в ( $c_2 \rightarrow \infty$ ) имеет вид

$$\ddot{q}_1 (1 + \rho \alpha_1^2) + 2\dot{q}_1 (n_1 + \rho \alpha_1 \beta_1 \omega) + k_2^2 q_1 = -\alpha_1 \omega^2 \rho (\beta_1 + M_{cvi}). \quad (3)$$

Движение ведомой массы исполнительного механизма по рис. 1, г ( $c_1 \rightarrow \infty$ ) описывается линейным дифференциальным уравнением

$$\ddot{q}_2 + 2n_2 \dot{q}_2 + k_2^2 q_2 = -(M_{cvi} + \varepsilon_i) \omega_1^2. \quad (4)$$

Если принять в качестве обобщенной координаты угол поворота  $\psi_2$  ведомого звена механизма, то в общем случае, когда функцию  $\varepsilon_i(\omega t)$  можно представить в виде тригонометрического ряда Фурье, решение уравнения (4)

при  $M_{cvi} = \text{const}$  и нулевых начальных условиях будет иметь вид

$$\psi_2 = e^{-n_2 t} (C_1 \cos \zeta t + C_2 \sin \zeta t) - \omega_1^2 \sum_{N=1}^{\infty} (Q_N \cos N\omega t + P_N \sin N\omega t) - M_{cvi} \omega_1^2 / k_2^2,$$

где  $N$  – порядковый номер гармоники;

$Q_N$  и  $P_N$  – коэффициенты ряда:

$$Q_N = Y^{-1} [q_N (k_2^2 - \omega_1 N^2) - 2p_N n_2 \omega_1 N];$$

$$P_N = Y^{-1} [p_N (k_2^2 - \omega_1 N^2) + 2q_N n_2 \omega_1 N];$$

$$C_1 = -\omega_1^2 \left( \sum_{N=1}^{\infty} Q_N + M_{cvi} / k_2^2 \right);$$

$$C_2 = \frac{\omega_1^2}{\zeta} \left[ -n_2 \left( \sum_{N=1}^{\infty} Q_N + \sum_{N=1}^{\infty} P_N N \omega_1 + M_{cvi} / k_2^2 \right) \right];$$

$$Y = (k_2^2 - \omega_1 N^2)^2 + 4n_2^2 \omega_1^4 N^2;$$

$$\zeta = \sqrt{k_2^2 - n_2^2}.$$

Дифференциальные уравнения (1)–(4) решали с помощью системы моделирования динамических систем Simulink [2]. Анализ результатов моделирования динамики многопозиционного автомата для сборки узлов топливной и гидравлической аппаратуры дизельных двигателей и мобильной грузоподъемной техники (структурная схема привода изображена на рис. 1, б) показывает, что моменты сил упругости  $M = c_2 \psi_2$  ведомых звеньев возрастают с уменьшением отношения жесткостей ведомой и ведущей подсистем механизма и уменьшаются с увеличением коэффициента  $k$  демпфирования колебаний (рис. 2). При заданном быстрейшем успокоении колебаний ведомой массы в точке позиционирования зависит от частоты и коэффициента демпфирования собственных колебаний системы.

Динамика многопозиционных сборочных машин-автоматов циклового типа с учетом

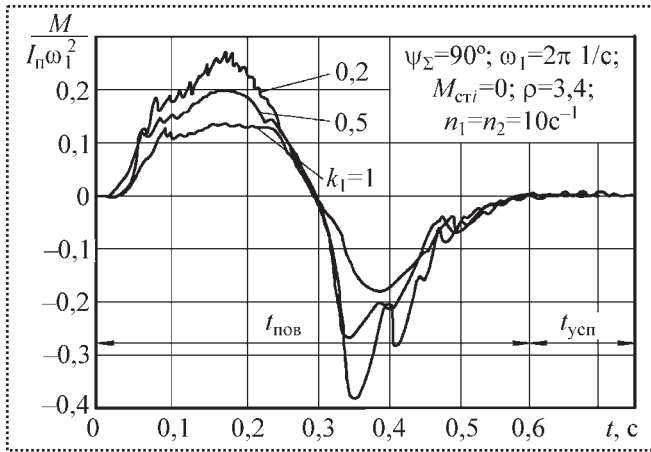


Рис. 2. Моменты сил упругости на валу привода многопозиционного сборочного автомата:

$t_{пов}$ ,  $t_{усп}$  – время поворота ведомой массы и продолжительность успокоения ее колебаний в точках позиционирования

пневмопривода описывается следующей системой безразмерных уравнений [3]:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \xi}{d\tau^2} (1+a_0) + \text{sign}\left(\frac{d\xi}{d\tau}\right) b_0 &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2 \lambda - \chi}{U_0^2}; \\ \frac{d\sigma_1}{d\tau} &= \frac{1,4}{\xi_{01} + \xi} \left[ \varphi(\sigma_1) - \sigma_1 \frac{d\xi}{d\tau} \right]; \\ \frac{d\sigma_2}{d\tau} &= \frac{1,4}{1 + \xi_{02} - \xi} \left[ \frac{\Omega}{\lambda} \sigma_2^{1,143} \varphi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right) - \sigma_2 \frac{d\xi}{d\tau} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

где  $a_0 = \frac{I_2 \omega_i^2}{m_n r^2}$ ;  $b_0 = \frac{I_2 N_i H}{m_n r^3}$ ;

$\sigma_1 = p_1/p_m$ ;  $\sigma_2 = p_2/p_m$ ;  $\sigma_a = p_a/p_m$ ;

$p_a$  – атмосферное давление;

$p_m$  – давление воздуха в магистрали;

$p_1$  и  $p_2$  – давление воздуха соответственно в рабочей и выхлопной полостях;

$\omega_i = (d\psi_2/d\varphi_1)\omega_1$  и  $\varepsilon_i = (d^2\psi_2/d\varphi_1^2)\omega_1^2$  – инварианты подобия угловой скорости и углового ускорения ведомого звена, здесь  $\varphi_1$  и  $\omega_1$  – угол поворота и угловая скорость ведущего звена;

$N_i = \omega_i \varepsilon_i$  – инвариант подобия кинетической мощности;

$m_n = m_1 + m_2 + I_1/r^2$  – приведенная масса;  $m_1$  – масса поступательно движущихся звеньев (поршень, шток);  $m_2$  – масса промежуточных

звеньев;  $I_1$  – момент инерции ведущей системы;  $r$  – радиус зубчатого колеса;  $\xi = x/H$ ;  $\tau = t/t_s$  – безразмерные переменные;  $H$  – ход поршня;  $t_s = S_1 H / (f_{01} K \sqrt{RT_m})$ ;  $x, t$  – обобщенная координата и время;  $f_{01}, f_{02}$  – эффективные площади проходного сечения подводящей и выхлопной линии;  $K = \sqrt{2k/(k-1)}$  – универсальная газовая постоянная воздуха (при показателе адиабаты для воздуха  $k = 1,4$  получим  $K = 2,646$ ;  $R = 287,14$  Дж/(кг·К));  $T_m = 290$  К – абсолютная температура воздуха в магистрали;

$\xi_{01} = x_{01}/H$ ;  $\xi_{02} = x_{02}/H$ ;  $x_{01}, x_{02}$  – приведенные координаты, соответствующие начальному и конечному объему цилиндра;

$\varphi(\sigma_1), \varphi(\sigma_a/\sigma_2)$  – функции расхода;

$\chi = \frac{F_\Sigma}{p_m S}$  – безразмерная нагрузка;

$\Omega = \frac{\mu_1 f_{02}}{\mu_2 f_{01}}$  – коэффициент пропускной способности соединительных линий привода,  $\mu_1, \mu_2$  – коэффициенты расхода подводящей и выхлопной линий;

$U_0 = \frac{f_{01} K}{S_1} \sqrt{\frac{m_n RT_m}{p_m S_1 H}}$  – константа, характеризующая соотношение размеров и параметров данного привода (безразмерный конструктивный параметр);

$\lambda = S_2/S_1$  – отношение площадей  $S_1, S_2$  торцев поршня со стороны рабочей и выхлопной полостей;

$F_\Sigma = F_1 + M_{ct} \omega_i r^{-1}$  – суммарная приведенная сила, обусловленная моментом сопротивления  $M_{ct}$  и силами трения  $F_1$  в цилиндре.

Переход от безразмерных параметров к действительным осуществляют по формулам [5]:

$$t_s = 1,03 \cdot 10^{-3} \frac{HD^2}{\mu_1 f_{01}} \tau;$$

$$\dot{x} = 9,74 \cdot 10^2 \frac{\mu_1 f_{01}}{D_u^2} \xi;$$





$$\ddot{x} = 9,49 \cdot 10^5 \frac{\mu_1^2 f_{01}^2}{D_{II}^4 H} \xi;$$

где  $D_{II}$  – диаметр цилиндра.

Без учета пневмопривода с достаточной для практических расчетов точностью динамика ведомого звена сборочного манипулятора с учетом упругости описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами

$$\ddot{\psi}_2 + 2n_g \dot{\psi}_2 + \vartheta^2 \psi_2 = -(M_{cti} + \varepsilon_i) \omega_1^2, \quad (6)$$

где  $\psi_2$ ,  $\dot{\psi}_2$ ,  $\ddot{\psi}_2$  – соответственно обобщенная координата, ее первая и вторая производные;  
 $n_g = 0,5n/I_2$  – приведенный коэффициент демпфирования системы;

$\vartheta = \sqrt{c/I_2}$  – угловая частота свободных колебаний ведомой массы;

$n$  – коэффициент рассеяния, характеризующий диссипативные свойства системы, связанные с силами сопротивления;

$M_{cti} = M_{ct}/I_2 \omega_1^2$  – относительный момент статических сопротивлений.

В случае кинетического нагружения, когда  $M_{cti} \rightarrow 0$ , его величиной можно пренебречь, так как сопротивление перемещению обусловлено силами трения в опорах колонны манипулятора. В общем случае, когда функцию  $\varepsilon_i(\omega t)$  удобно представить в виде тригонометрического ряда Фурье, уравнение движения исполнительного звена манипулятора будет иметь вид

$$\begin{aligned} \ddot{\psi}_2 + 2n_g \dot{\psi}_2 + \vartheta^2 \psi_2 = \\ = -\omega_1^2 \sum_{N=1}^{\infty} (y_N \cos N\omega t + z_N \sin N\omega t) - M_{cti} \omega_1^2, \end{aligned}$$

где  $y_N$  и  $z_N$  – коэффициенты ряда.

Решая данное уравнение при нулевых начальных условиях, получим

$$\begin{aligned} \psi_2 = e^{-n_g t} (A_1 \cos vt + A_2 \sin vt) - \\ - \omega_1^2 \sum_{N=1}^{\infty} (y_N \cos N\omega t + z_N \sin N\omega t) - M_{cti} \omega_1^2 / \vartheta^2, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $v = \sqrt{\vartheta^2 - n_g^2}$ ;

$$A_1 = -\omega_1^2 \left( \sum_{N=1}^{\infty} Y_N + M_{cti} / \vartheta^2 \right);$$

$$A_2 = -\omega_1^2 v^{-1} \left[ -n_g \left( \sum_{N=1}^{\infty} Y_N + \sum_{N=1}^{\infty} Z_N N \omega_1 + M_{cti} / \vartheta^2 \right) \right];$$

$$Y_N = \frac{y_N (\vartheta^2 - \omega_1 N^2) - 2z_N n_g N \omega_1}{W};$$

$$Z_N = \frac{z_N (\vartheta^2 - \omega_1 N^2) + 2y_N n_g N \omega_1}{W};$$

$$W = (\vartheta^2 - \omega_1 N^2)^2 + 4n_g^2 N^2 \omega_1^4.$$

В крайних точках позиционирования исполнительный орган сборочного манипулятора фиксируется, при этом ведомая масса, упруго связанная с колонной, совершает свободные затухающие колебания:

$$\psi_2 = e^{-n_g t} \left( \psi_2^0 \cos vt + \frac{n_g \psi_2^0 + \omega_i^0}{v} \sin vt \right), \quad (8)$$

где параметры  $\psi_2^0$  и  $\omega_i^0$  соответствуют идеальному механизму.

Из анализа выражения (8) следует, что при заданной угловой скорости  $\omega_1$  зубчатого колеса и скорости поршня  $v_{шт} = \text{const}$  продолжительность  $t_{усп}$  успокоения колебаний ведомой массы зависит от частоты  $\vartheta$  и коэффициента демпфирования  $n_g$  собственных колебаний системы. Для сокращения продолжительности  $t_{усп}$  необходимо осуществлять отдельную фиксацию ведомого звена и колонны манипулятора.

Зависимости (7), (8) описывают динамику исполнительного звена манипулятора с учетом упругости звеньев при равномерном движении поршня пневмоцилиндра. Для других режимов работы ( $v_{шт} \neq \text{const}$ ) в формулы (7), (8) следует подставлять мгновенные значения параметра  $\omega_{1i}$ , полученные из совместного реше-

ния уравнений (5) динамики системы. При этом  $\omega_i = \dot{x}_i / r$ , где  $i$  – шаг, равный числу делений рабочего хода поршня;  $\dot{x}_i$  – мгновенная скорость поршня.

На рис. 3 приведены результаты моделирования динамики сверхлегкого сборочного манипулятора номинальной грузоподъемностью 0,16 кг, соответствующие исходным параметрам:  $\psi_{\Sigma \max} = 1,57$  рад;  $I_{\Pi} = 2,5 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>;  $D_{\Pi} = 0,032$  м;  $H = 0,09$  м;  $p_M = 0,4$  МПа;  $f_{01} = f_{02} = 4,9 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>;  $\chi = 0,3$ ;  $\zeta = 0,9$ ;  $U_0 = 0,4$ .

Перед включением пневмопривода принимали начальные условия:  $p_1(0) = p_a$  и  $p_2(0) = p_M$  или в безразмерных параметрах  $\sigma_a = 0,25$ ;  $\sigma_2 = 1$ .

Анализ рис. 3, а показывает, что на большей части рабочего хода закон движения поршня

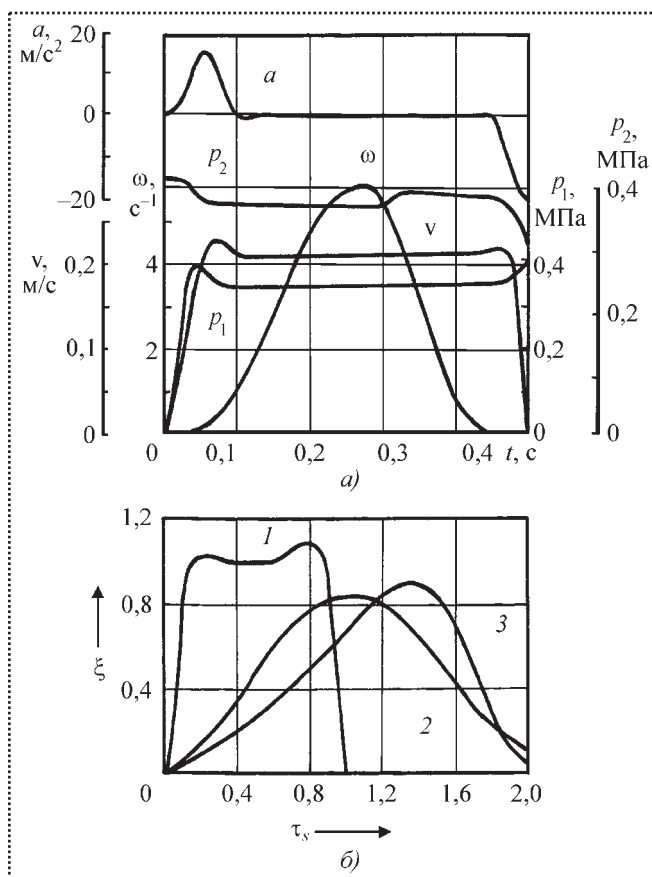


Рис. 3. Результаты моделирования динамики сборочного манипулятора с учетом реализуемого закона движения исполнительного звена:

1 – циклоидальный; 2 –  $\omega_i = \text{const}$ ; 3 –  $\omega_i \neq \text{const}$

равномерный ( $\dot{x} = \text{const}$ ). Кривая угловой скорости  $\omega$  исполнительного звена манипулятора монотонно возрастает от 0 до  $5,8 \text{ c}^{-1}$ , а затем также монотонно убывает, при этом характер кривой  $\omega$  соответствует циклоидальному закону движения. Графики изменения давления в рабочей  $p_1$  и выхлопной  $p_2$  полостях соответствуют реализуемому закону движения поршня для конструктивного параметра  $U_0 = 0,4$ . Время углового позиционирования исполнительного органа манипулятора  $t_{\Sigma} = 0,45$  с, время рабочего хода штока  $t_{\text{штт}} = 0,5$  с.

На рис. 3, б представлены результаты моделирования в безразмерном виде динамики сборочного манипулятора с пневмоприводом, отличающиеся законами движения передаточных механизмов. Для сравнительной оценки были отобраны широко используемые в приводах транспортно-загрузочных и сборочных манипуляторов механизмы:

1 – планетарно-цевочный кулисный механизм (ПР Икар-0,16, Икар-2,5, М-0,1 и др.);

2 – механизм рейка – зубчатое колесо (ПР мод. МП-9С, МП-11, ИМ-1, Гейм, Циклон-5, Бриг-10Б, РП-5, Felsomat FE29, Flexsimen, Autohand АН-40 ( $\omega_i = \text{const}$ ) и др.);

3 – механизм с качающейся кулисой (ПР мод. РФ-202М, РФ-204, Краб-рекупер, Rimp-01, МНУ-Junior 305, RBA-5, Skilam SR-3000G, Melfa RV-2AJ ( $\omega_i \neq \text{const}$ ) и др.).

Из анализа рис. 3, б видно, что по критерию быстродействия  $\tau_s$  первый механизм с циклоидальным законом движения является наилучшим. Второй, характеризующийся постоянной передаточной функцией ( $\omega_i = \text{const}$ ), уступает по быстродействию приводу с качающейся кулисой (третий механизм с  $\omega_i \neq \text{const}$ ). Безразмерная скорость  $\xi$  штока наибольшая у пневмопривода с первым передаточным механизмом.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований динамики и оптимизационного синтеза по критериям быстродействия и прочности механизмов позиционирования сборочных машин-автоматов и

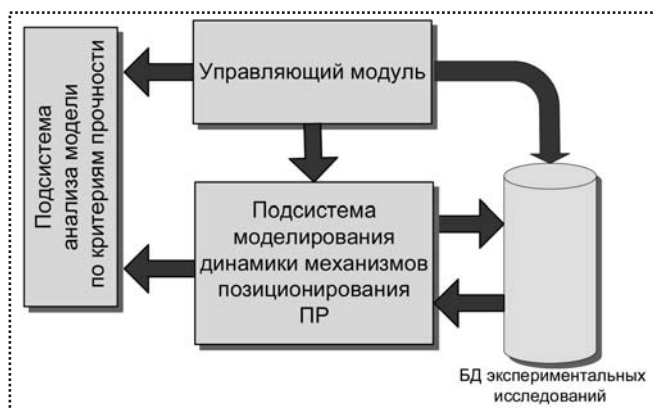


Рис. 4. Структура автоматизированной подсистемы анализа динамики механизмов позиционирования мехатронных сборочных систем

мехатронных систем разработана специализированная система автоматизированного моделирования, включающая три этапа:

- моделирование силового воздействия на звенья привода на основе кинематической и динамической модели;
- верификация параметров динамической модели при сравнении полученных результатов с экспериментальными данными;
- многовариантный оптимизационный синтез параметров механизма по критериям быстродействия и прочности.

Структура данной системы приведена на рис. 4.

Алгоритмы и блок-схемы подсистем моделирования динамики и оптимизационного синтеза группы цикловых механизмов линейного и углового позиционирования по критериям прочности рассмотрены в [3, 4]. Там же

приведены блок-схемы алгоритмов синтеза параметров пневмопривода по критерию быстродействия.

Выходные параметры данной системы могут передаваться в экспресс-модели и экспресс-системы, например, для оценки напряженного состояния звеньев и узлов привода, или в CAD/CAM-системы ANSYS/Mechanical, Nastran, Design Space, Pro/ENGINEER, КОМПАС ("Универсальный механизм") и др.

*Использование обобщенных динамических моделей приводов многопозиционных машин-автоматов и мехатронных систем с электро- и пневмоприводом позволяет на стадии проектирования существенно улучшить динамику автоматизированных сборочных систем и создает предпосылки для повышения их производительности и надежности.*

#### Библиографический список

1. Динамика машин и управление машинами: справочник / В.К. Асташев, В.И. Бабицкий, И.И. Вульфсон и др.; под ред. Г.В. Крейнина. — М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
2. Дэбни Дж.Б., Харман Т.Л. Simulink® 4. Секреты мастерства; пер. с англ. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 403 с.
3. Надеждин И.В. Быстродействующие манипуляторы для автоматизации процессов сборки мелких деталей в машиностроении и приборостроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005. № 8. С. 20–27.
4. Надеждин И.В. Синтез планетарно-цевочных кулисных механизмов многопозиционных машин-автоматов по условиям прочности // Инженерный журнал. Справочник. 2006. № 6. С. 24–30.
5. Герц Е.В., Крейнин Г.В. Расчеты пневмоприводов: справочное пособие. — М.: Машиностроение, 1975. 272 с.

УДК 621.757

**А.Н. Журавлев** (ОАО "Волгабурмаш", г. Самара),  
**С.В. Толоконников** (ОАО "Моторостроитель", г. Самара), канд-ты техн. наук,  
**М.Г. Дорбышев** (ГУ "Специальное управление ФПС № 39 МЧС России")  
E-mail: zan.samgtu@mail.ru

## Оценка влияния точности сборки на эксплуатационные параметры волновой зубчатой передачи

На основе имитационного моделирования в программном продукте Adams проведена оценка влияния точности взаимного расположения деталей волновой зубчатой передачи на параметры ее функционирования во время эксплуатации. Даны рекомендации по совершенствованию технологического процесса сборки волновых зубчатых передач с целью повышения их эксплуатационных показателей.

On the basis of imitating simulation in software product Adams the estimation of influence of precision of a relative positioning of details of a wave gear on parameters of its functioning during operation is realized. Recommendations on perfection of technological process of assembly of wave gears with the purpose of increase of their operational parameters are given.

**Ключевые слова:** волновая зубчатая передача, структурно упорядоченная сборка, погрешность сборки, угловая скорость, контактные силы.

**Key words:** wave gear, structurally ordered assembly, error of assembly, angular velocity, contact forces.

Волновые зубчатые передачи в настоящее время нашли широкое применение в приводах опорно-поворотных устройств телескопов, робототехнике, в системах управления и т.п. Их достоинства заключаются в возможности получения значительных передаточных чисел, небольшой массе и габаритных размерах, высокой кинематической точности передачи в результате многопарного зацепления зубьев. Волновые зубчатые передачи по сравнению с обычными долговечнее и имеют более низкий уро-

вень шума. Среди большого числа различных конструктивно-компоновочных схем наиболее совершенной представляется передача, оснащенная эллиптическим генератором волн деформации с гибким подшипником. Схема такой передачи показана на рис. 1 [1].

В настоящее время такие волновые зубчатые передачи часто стали применять в конструкциях дорогостоящих приводов космических аппаратов. Это позволяет осуществлять передачу крутящего момента с большими передаточными отношениями в диапазоне от 60 до 300. Известно, что к космическим аппаратам предъявляются высокие требования по точности изготовления отдельных деталей, входящих в сборочные узлы изделия. Основным эксплуатационным параметром для космического аппарата является его ресурс. По

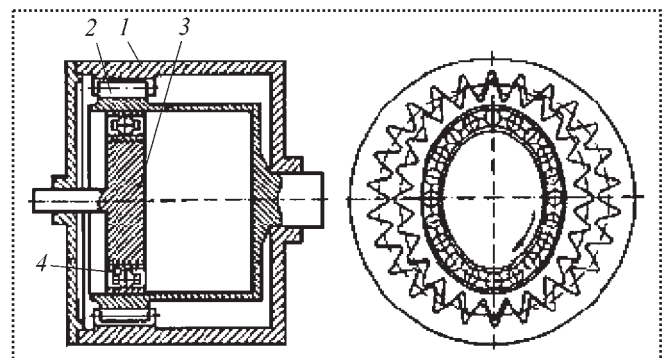


Рис. 1. Схема волновой зубчатой передачи:

- 1 – жесткое колесо;
- 2 – гибкое колесо;
- 3 – генератор волн деформации;
- 4 – гибкий подшипник





статистике отказов основным сборочным узлом, определяющим работоспособность привода космического аппарата в целом, является волновая зубчатая передача.

Как показали стендовые испытания, проведенные в период с 2005 по 2008 г., существующий технологический процесс сборки приводов с волновой зубчатой передачей не обеспечивает заданный ресурс изделия (900 ч) несмотря на высокую точность изготовления деталей, входящих в сборочный узел. Причина отказов носит случайный характер: разрушение по впадине между зубьями гибкого колеса или по его зубчатому венцу, скручивание гибкого колеса.

В производственных условиях точность волновой зубчатой передачи получают путем тщательного изготовления входящих в нее деталей, а также путем повышения точности взаимного расположения деталей, входящих в данный сборочный узел. Сборка передачи проводится без промежуточных регулировок и выставок одних деталей относительно других. Все зазоры и погрешности определяются жесткими допусками. Однако несмотря на высокую точность изготовления отдельных деталей при сборке возникают погрешности, которые существенно влияют на параметры функционирования передачи и ресурс всего привода в целом. Доминирующим видом погрешности является перекося генератора волн с гибким подшипником относительно гибкого колеса.

Для исследования влияния погрешностей взаимного расположения деталей на процесс эксплуатации волновой зубчатой передачи применяли вычислительный пакет ADAMS, позволяющий проводить имитационное моделирование сложных механических систем, к которым относятся данные передачи.

Пакет ADAMS/View предназначен для создания, тестирования и оптимизации работы моделей механизмов и конструкций, состоящих из абсолютно твердых тел и их соединений. Разработаем в САХ-системе NX компании Siemens PLM Software 3D-модели деталей для двух вариантов сборки двухволновой зуб-

чатой передачи: без отклонения оси генератора волн относительно оси гибкого колеса и с перекося этих осей, равным 0,05 град. Численное значение погрешности взято из статистических данных изготовления таких передач в действующем производстве.

Следует подчеркнуть, что разработанная в ADAMS имитационная модель является упрощенной, так как в ней гибкий подшипник и генератор волн объединены в одно тело.

Импортируем в ADAMS созданные два варианта сборок математических моделей деталей волновой зубчатой передачи в формате Parasolid. Из библиотеки материалов с заранее известными свойствами выбираем сталь для всех деталей: генератора волн, гибкого и жесткого колес.

После того как все необходимые части моделей созданы, необходимо указать, какими средствами они соединяются (рис. 2).

Модель генератора волн соединена с неподвижной опорой (фундаментом) цилиндрическим шарниром, ось которого направлена вдоль оси  $Y$ . Жесткое колесо соединено с неподвижной опорой (фундаментом) аналогично. Гибкое колесо соединено с фундаментом двумя скользящими шарнирами, один из которых направлен вдоль оси  $Z$ , а другой – вдоль оси  $X$ . Таким образом, гибкое колесо имеет степень свободы только в плоскости  $ZX$ . Генератор волн и жесткое колесо в свою очередь могут вращаться вокруг общей оси соединения и скользить вдоль нее.

Частота вращения генератора волн в реальных условиях составляет  $\omega = 100$  об/мин, или 10,47 рад/с. Данное значение было принято для расчета в качестве управляющего движения в модели. В соединениях "генератор волн – гибкое колесо" и "гибкое колесо – жесткое колесо" создаем контакты CONTACT\_1 и CONTACT\_2 соответственно. Задаем временной интервал процесса численного моделирования 0,1 с с количеством шагов по времени, равным 1000, и запускаем процесс численного моделирования, который в терминологии ADAMS называется симуляцией.

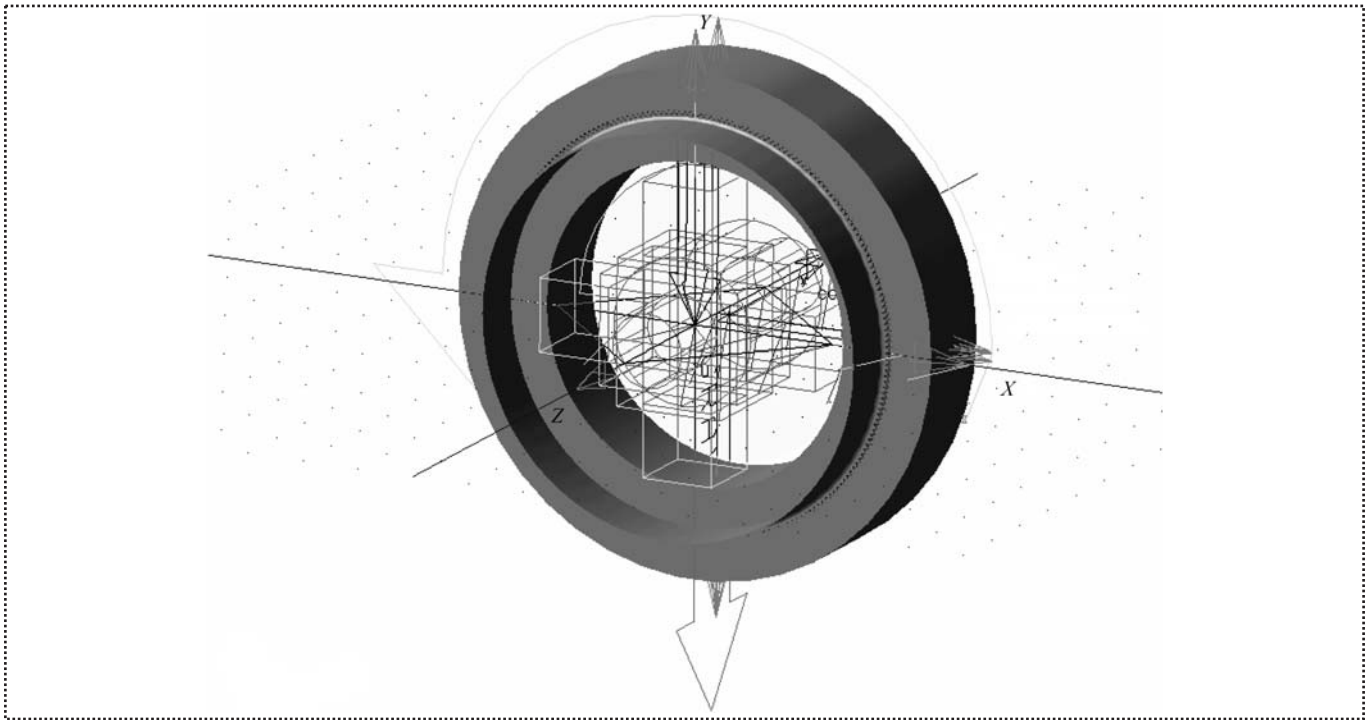


Рис. 2. Имитационная модель волновой зубчатой передачи

В результате взаимодействия генератора волн, гибкого и жесткого колес возникают контактные силы, которые определяют параметры этого взаимодействия (рис. 3). Как видно, кон-

тактные силы возникают в двух диаметрально противоположных зонах, что соответствует двухволновой конструкции исследуемой передачи.

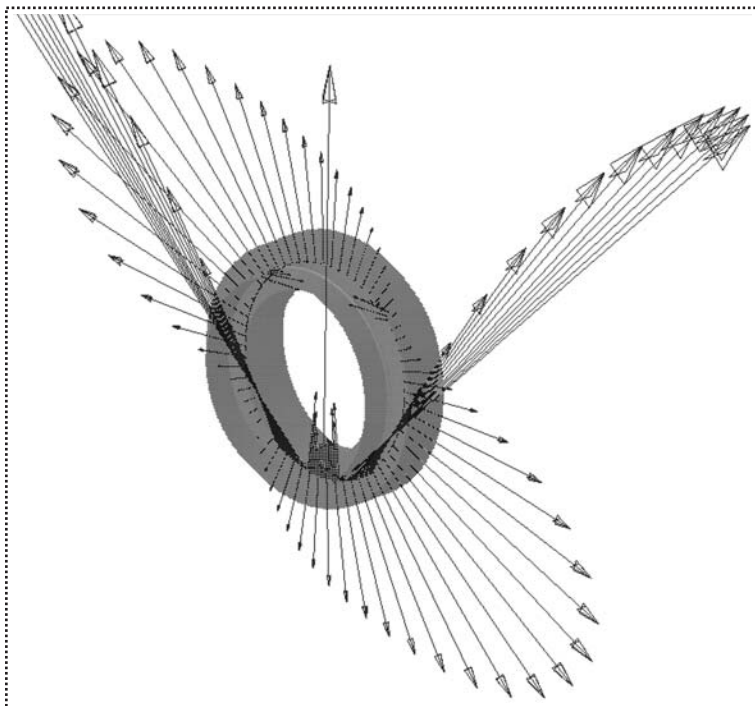
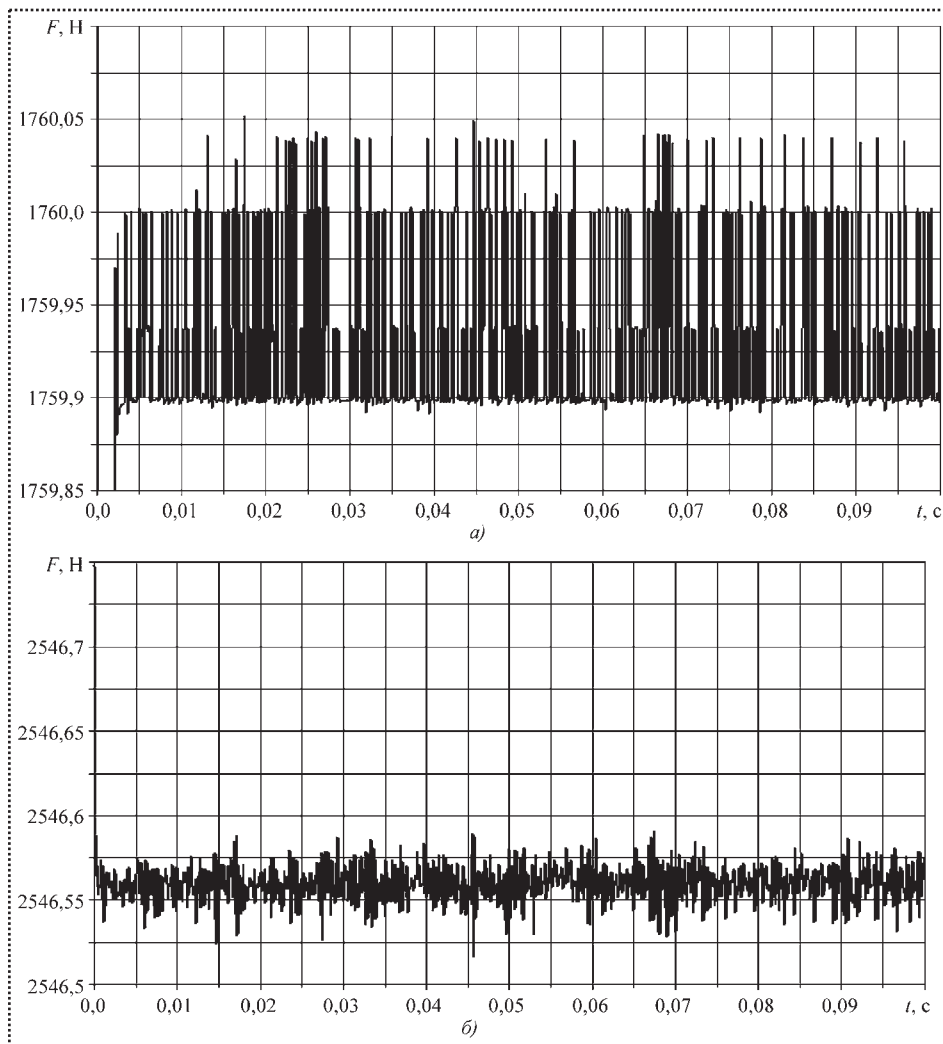


Рис. 3. Схема контактных сил при взаимодействии деталей волновой зубчатой передачи

ADAMS сохраняет все значения динамических характеристик объектов, входящих в модель, полученные на этапе симуляции. Для просмотра этих значений в ADAMS существует постпроцессор. После окончания симуляции выводим графики изменения по времени абсолютных величин контактных сил в зубчатом зацеплении для двух вариантов сборки волновой зубчатой передачи (рис. 4). Как видно из графиков, контактные силы в зубчатом зацеплении передачи, собранной без погрешности взаимного расположения поверхностей генератора волн и гибкого колеса, существенно меньше, чем в собранной с прекосом 0,05 град. Разница составляет порядка 30 %.

Рассмотрим еще один важный эксплуатационный параметр, от которого зависит передаточное отношение волновой зубчатой передачи, — угловую скорость вращения жесткого колеса. Для этого выведем графики изменения по времени абсолют-



**Рис. 4. Графики изменения контактных сил в зубчатом зацеплении:**  
*а* – сборка без погрешности взаимного расположения поверхностей;  
*б* – сборка с перекосом 0,05 град

ных величин угловой скорости центра масс жесткого колеса для двух вариантов сборок (рис. 5). Как видно из графиков, максимальные значения угловой скорости жесткого колеса передачи, собранной без погрешности, составляют порядка 0,052 рад/с, тогда как для собранной с перекосом – порядка 0,025 рад/с. Таким образом, во втором случае не обеспечивается необходимое передаточное отношение ввиду низких значений угловой скорости жесткого колеса – на 60 % меньше необходимых, задаваемых конструктором.

Достоверность разработанной имитационной модели подтверждается удовлетворительным совпадением результатов моделирования по уг-

ловой скорости вращения жесткого колеса, равной 0,052 рад/с (0,496 об/мин), с экспериментальными данными – 0,6 об/мин. Расхождение составляет 17,5 %.

Разработанная имитационная модель позволяет оценить, насколько погрешность взаимного расположения деталей при сборке волновой зубчатой передачи влияет на ее эксплуатационные характеристики (контактные силы в зацеплении, угловую скорость жесткого колеса), а также оценить малую эффективность традиционной сборки в действующем производстве.

Как было отмечено выше, применяемая в настоящее время технология неупорядоченной сборки волновых зубчатых передач по методу пригонки, т.е. с произвольным угловым расположением деталей в соединениях, не обеспечивает высокой точности при сборке, от которой во многом зависят эксплуатационные показатели сборочного узла и, как следствие, ресурс всего собираемого изделия.

Причина малой эффективности традиционных методик и алгоритмов сборки подвижных соединений, в том числе и волновых зубчатых передач, базирующихся на пяти общепринятых методах достижения точности замыкающего звена, связана с тем, что в настоящее время исследования сборочных процессов ограничиваются размерным анализом, в то время как на этапе сборки завершается формирование эксплуатационных свойств изделий и появляется возможность прогнозировать показатели их качества.

Разработка технологического процесса сборки должна опираться на системный под-

ход, требующий выявления связей между выходными показателями изделия и технологическими параметрами сборки, зависящими от структуры собираемого изделия, под которой понимается определенное взаимное расположение деталей в соединениях.

В связи с изложенным для совершенствования технологического процесса сборки волновых зубчатых передач предлагается применить методологию структурно упорядоченной сборки [2], в основе которой лежат следующие положения:

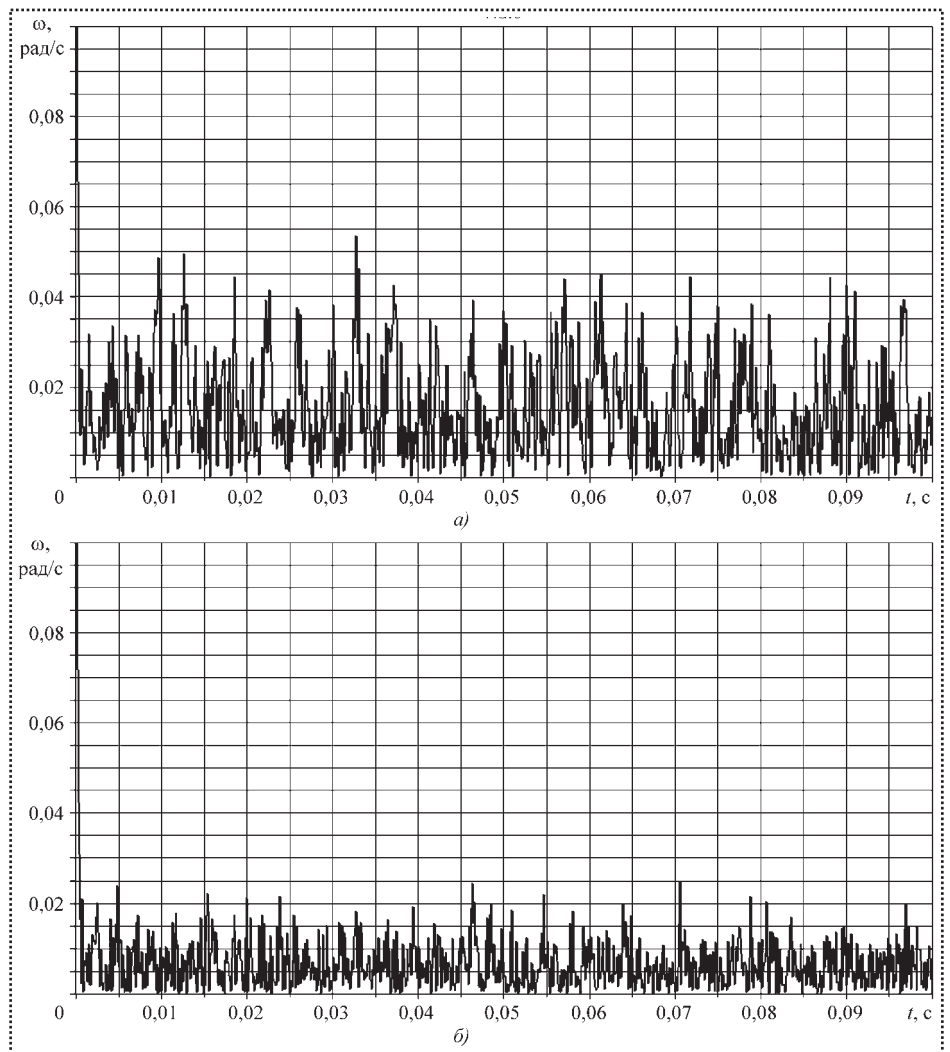
- сложное изделие представляется совокупностью более простых сборочных объектов, связи между которыми описываются интегральными структурными параметрами;

- существуют функциональные связи между структурными параметрами и показателями качества изделия, выражаемые в виде расчетных моделей;

- на основе математического анализа выявляются рациональные структурные параметры изделия путем исключения множества неперспективных вариантов сборок по критерию рационального значения выходного параметра;

- в процессе сборки реализуется рациональная структура, обеспечивающая повышение качества изделий.

На основе данной методологии разрабатывается методика структурно упорядоченной сборки привода с волновой зубчатой передачей, включающая декомпозицию изделия с выявлением структурных параметров соединений, разработку моделей, описывающих обратные связи между выходными и структурными пара-



**Рис. 5. Графики изменения угловой скорости жесткого колеса:**  
 а – сборка без погрешности взаимного расположения поверхностей;  
 б – сборка с перекосом 0,05 град

метрами изделий, и выбор рациональной структурной схемы сборки по критерию максимального качества изделий.

*Предлагаемая методология позволит управлять показателями качества привода с волновой зубчатой передачей на этапе сборки и добиваться взаимной компенсации погрешностей в соединениях.*

#### Библиографический список

1. Борзилов Б.М. Волновые зубчатые передачи: достижения и перспективы // Редукторы и приводы. – 2007. № 2. С. 22–24.
2. Журавлев А.Н. Разработка методологии структурно упорядоченной сборки сложных механических систем на основе декомпозиции взаимодействия соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. № 9. С. 21–27.





УДК 621.787.4

**Я.Н. Отений**, д-р техн. наук, **Н.В. Ольштынский**, **С.Н. Ольштынский**, канд-ты техн. наук,  
**Н.Г. Щёголев** (Камышинский технологический институт (филиал)  
 Волгоградского государственного технического университета)  
 E-mail: vepr@mail.ru

## Автоматизация оценки параметров зоны упругопластической деформации при обработке сопрягаемых поверхностей деталей

*Предложена конструкция универсальной установки для измерения геометрических параметров зоны упругопластической деформации (площади, формы и глубины контакта и полуширины контакта по его длине) при экспериментальных исследованиях сопрягаемых поверхностей деталей, а также оригинальный метод автоматизации оценки экспериментальных данных с требуемой точностью.*

*Design of universal installation is offered for measurement of geometric parameters of zone of elastoplastic deformation (the areas, forms and depths of contact and half of width contact on its length), under experimental researches of adjointable surfaces of details and original method of automation of estimation experimental results with required accuracy.*

**Ключевые слова:** пластическое деформирование, сопрягаемые поверхности, контактная зона, глубина упрочнения.

**Key words:** plastic deformation, mating surfaces, contact zone, depth of hardening.

Контактное нагружение является одним из наиболее распространенных случаев силового взаимодействия деталей машин. Оно возникает при сборке, совместной работе сопряженных элементов машин, а также при осуществлении технологических процессов упрочнения поверхностным пластическим деформированием (ППД) сопрягаемых поверхностей деталей машин перед их сборкой. С учетом того что основными процессами в машиностроении являются механическая обработка и сборка, автоматизация технологической подготовки, а также проведение научно-исследовательских изысканий значительно сокращают их сроки.

Одним из основных факторов, влияющих на показатели качества поверхностного слоя при ППД, является оценка параметров зоны упругопластической деформации между деформирующим элементом и обрабатываемой деталью. При этом параметры зоны упругопластической деформации зависят от глубины внедрения деформирующего элемента в деталь, геометрических параметров деформирующего элемента и обрабатываемой заготовки, а также ее шероховатости.

При экспериментальных исследованиях геометрических параметров зоны упругопластической деформации необходимым и достаточным считается измерение таких величин, как ее площадь, форма, глубина контакта и полуширина контакта по его длине. Однако проведение экспериментальных исследований в этой области имеет определенные сложности, заключающиеся в необходимости учитывать большое количество факторов, связанных с податливостью технологической системы, деформацией заготовки и инструмента, а также сложностью измерения с требуемой точностью параметров криволинейной формы площади зоны упругопластической деформации.

Следовательно, разработка метода автоматизации получения экспериментальных данных с достаточной достоверностью при оценке параметров зоны упругопластической деформации является актуальной задачей. Для ее решения разработана и изготовлена универсальная установка, схема которой показана на рис. 1, а.

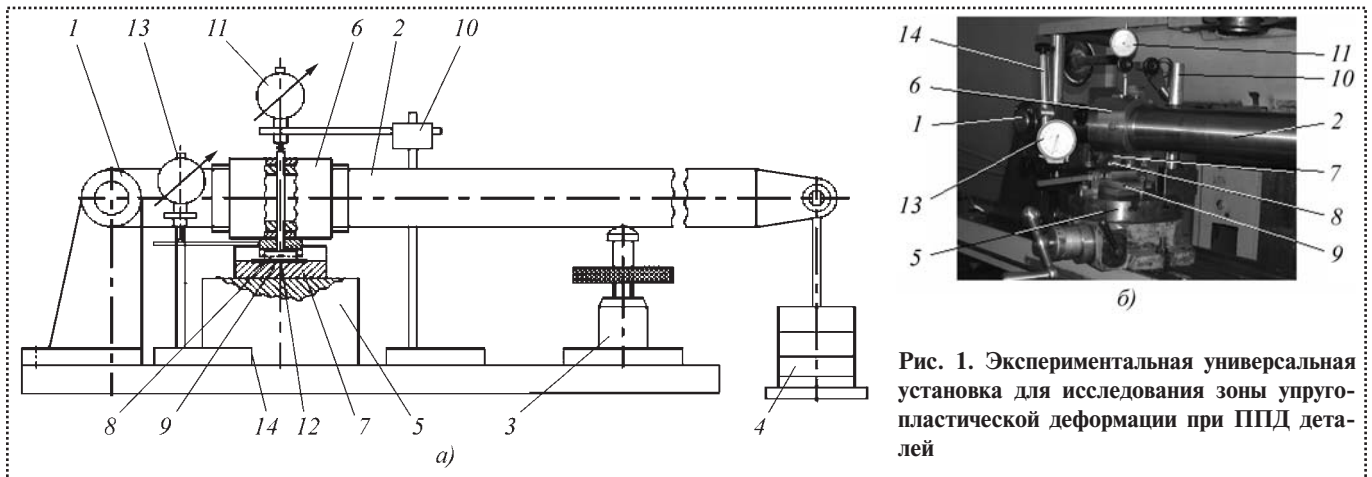


Рис. 1. Экспериментальная универсальная установка для исследования зоны упруго-пластической деформации при ППД деталей

Установка состоит из кронштейна 1, на котором шарнирно установлен рычаг 2; устройства для плавного нагружения 3, представляющего собой винтовой домкрат, имеющий на конце опору шарового типа; подвески с переменными грузами 4, шарнирно закрепленной на конце рычага 2; поворотного стола 5. Поворотный стол 5 оснащен ручным механизированным приводом, позволяющим изменять угол установки стола относительно оси рычага 2. Муфта 6, подвижно установленная на рычаге 2, имеет сквозное радиальное отверстие, совпадающее с радиальным отверстием в рычаге 2, и фиксируется как в вертикальном положении (см. рис. 1), так и под любым другим углом.

Кроме того, к муфте 6 крепится универсальная призма 7, также имеющая отверстие, совпадающее с отверстиями в муфте 6 и рычаге 2. При этом призма 7 имеет возможность установки под любым заданным углом, лежащим в вертикальной плоскости универсальной установки. Деформирующий элемент 8 располагают между универсальной призмой 7 и поверхностью детали 9 (например, сегмента трубы), закрепленной на поворотном столе 5. В соответствии с конструктивными особенностями, описанными выше, деформирующий элемент 8 устанавливают под некоторыми углами как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

На штативе 10 установлен индикатор 11 часового типа, измерительный щуп которого проходит через радиальные отверстия муфты 6, рычага 2, универсальной призмы 7 и опирается наконечником на деформирующий элемент 8. Индикатор часового типа имеет шкалу измерения 2 мкм. Между деформирующим элементом 8 и поверхностью детали 9 размещают промежуточный элемент 12, представляющий собой полосу однородной матовой папиросной бумаги. Универсальную призму 7 устанавливают в заданное положение с помощью индикатора 13 часового типа, который закреплен в штативе 14.

Экспериментальную оценку параметров зоны упругопластической деформации между деформирующим элементом и обрабатываемой деталью проводят следующим образом. Поворотный стол 5 и универсальную призму 7 устанавливают под определенными углами относительно горизонтальной и вертикальной плоскостей, фиксируя деформирующий элемент 8 с заданными углами самозатягивания и внедрения соответственно методике проведения эксперимента. Далее под воздействием силы предварительно рассчитанной величины, обеспечиваемой грузом 4 на подвеске с учетом отношения 1/7 плеч рычага 2, деформирующий элемент 8 внедряют в исследуемую поверхность детали 9. При этом на промежуточном элементе 12 образуется отпечаток зоны упругопластической деформации в виде про-



зрачного пятна. В это же время индикатор 11 фиксирует вертикальное перемещение деформирующего элемента 8, равное сумме глубины его внедрения в поверхность детали 9 и величины деформации самого элемента 8. Деформацию элемента 8 учитывают согласно расчетным зависимостям или экспериментальным коэффициентам. Согласно литературным данным [1, 2] она составляет не более 1...2 %

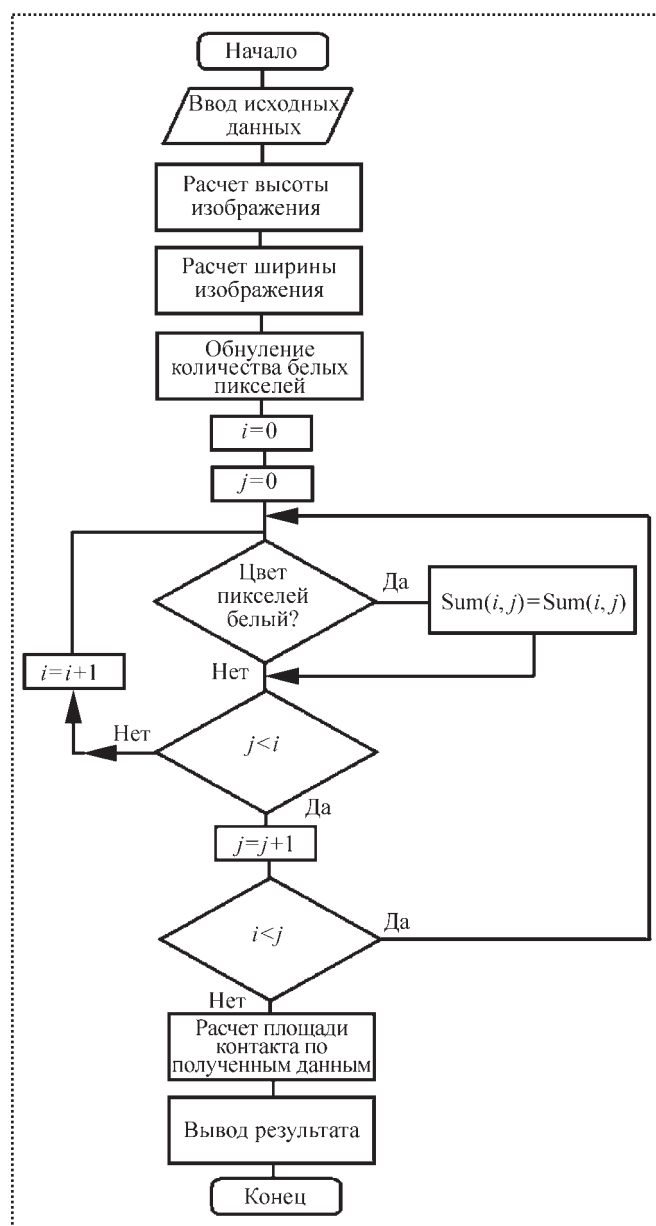


Рис. 2. Блок-схема определения площади отпечатка зоны упругопластической деформации

от глубины внедрения деформирующего элемента.

На рис. 1, б разработанная универсальная установка показана в рабочем состоянии. Она позволяет проводить комплекс исследований влияния силы ППД на геометрические параметры зоны упругопластической деформации при варьировании таких параметров, как кривизна исследуемой поверхности детали (диаметр сегмента трубы), силы, прикладываемой к деформирующему элементу, геометрических параметров самого деформирующего элемента, исходной шероховатости исследуемой поверхности детали, углов самозатягивания и внедрения при установке деформирующего элемента. Значения варьируемых параметров определены согласно методике проведения экспериментальных исследований.

Обработка результатов экспериментальных исследований выполнена по разработанной программе автоматизированной оценки параметров зоны упругопластической деформации [3]. Программа действует следующим образом. Полученный на промежуточном элементе (полосе матовой папиросной бумаги) отпечаток сканируют с разрешением 1200 точек на квадратный дюйм. Изображение отпечатка зоны упругопластической деформации после сканирования обрабатывают в графическом редакторе и сохраняют в файле с расширением BMP (Windows Bitmap).

Далее отредактированное изображение отпечатка передают в модуль расчета программы, блок-схема которой представлена на рис. 2. В этом модуле стандартными функциями языка Object Pascal, предназначенными для работы с растровой графикой, исключают все пиксели вокруг отпечатка, имеющие параметр цветности, отличный от белого [4, 5]. В блоке программы, отвечающем за математическую обработку данных, рассчитывают общее число пикселей на изображении, а затем их количество, соответствующее заданной границе цветности.

В результате обработки полученных данных определяли число пикселей, приходящихся на





пятно контактной зоны, соотношение которых к их общему количеству позволяет определить площадь отпечатка зоны упругопластической деформации, выраженной в любой размерности, например в квадратных миллиметрах. Кроме того, алгоритм расчета и программа для автоматизированной оценки параметров зоны упругопластической деформации позволяют определить величины ее полуширины и длины, выраженной в заданной размерности.

Для подтверждения достоверности результатов автоматизированной оценки параметров зоны упругопластической деформации использовали большой инструментальный микроскоп (БМИ), с помощью которого определяли параметры отпечатка контактной зоны непосредственно на исследуемой поверхности детали. Предел допустимой основной погрешности БМИ составляет не более  $\pm 0,003$  мм. Исследования показали, что при автоматизированной оценке параметров зоны упругопластической деформации с помощью метода подсчета количества пикселей по параметру цветности на промежуточном элементе ошибка не превышает 5 %.

*Таким образом, предложенная универсальная установка позволяет проводить экспериментальные исследования с широким спектром варьируемых параметров, а оригинальный метод автоматизации оценки геометрических параметров зоны упругопластической деформации (площади, формы, глубины контакта и полуширины контакта по его длине) при исследованиях сопрягаемых поверхностей деталей позволяет получать экспериментальные данные при снятии результатов измерений с требуемой точностью.*

#### Библиографический список

1. Сегал В.П. Пластический контакт при движении шероховатого цилиндра по идеально пластическому полупространству // Механика твердого тела. – 1971. № 3. С. 183–189.
2. Отений Я.Н., Смольников Н.Я., Ольштынский Н.В. Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: Монография / Волгоград: ВолГТУ. 2003. 99 с.
3. Ольштынский С.Н. Исследование и создание центробежного раскатника для обработки отверстий поверхностным пластическим деформированием. Дисс. ... канд. техн. наук. – Волгоград: ВолГТУ. 2002. 161 с.
4. Баас Р., Фервай М., Гюнтер Х. Delphi 4: Полное руководство. 1999. 800 с.
5. Дантерманн Д., Мишел Д., Тейлор Д. Программирование в среде Delphi: Пер. с англ. – К.: НИПФ "ДиаСофт Лтд." 1995. 608 с.



### ХОЛОДНОТВЕРДЕЮЩИЕ СВЯЗУЮЩИЕ И СМЕСИ ДЛЯ ЛИТЕЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ И ФОРМ: справочник С.С. Жуковский

256 с.: ил. ISBN: 978-5-94275-499-0

Цена 500 р.

Приведены номенклатура холоднотвердеющих связующих и смесей (ХТС) для изготовления стержней и форм, а также их производители в промышленно развитых странах и России. Представлены составы, анализ химических и технологических характеристик ХТС и связующих, методики исследовательских и производственных испытаний, методы управления свойствами. Описаны вспомогательные материалы для новых процессов: разделительные покрытия, средства очистки оснастки, клеи.

Рассмотрены вопросы, связанные с внедрением ХТС на стадии предварительной проработки и промышленного освоения: характеристики и правила применения противопопригарных покрытий, технологические параметры изготовления стержней и форм, регенерация смесей, техника безопасности и экологические характеристики. Приведены примеры расчетов экономической эффективности для конкретных производств.

Для специалистов литейного производства, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

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





УДК 681.2-52

**Ю.Н. Матросова**, канд. техн. наук, зав. кафедрой "Прикладная математика и САПР"  
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)  
mae76@yandex.ru

## Программное обеспечение для автоматизированной обработки результатов контроля физико-механических свойств изделий из пористых материалов перед сборкой

*Теоретически обоснован способ, разработано устройство и программное обеспечение для автоматизированной обработки результатов контроля физико-механических свойств изделий из пористых материалов перед сборкой на основе трехмерной модели течения газа через материал.*

*Theoretically justified method, developed the device and software for automated data processing control results parameters of porosity and physico-mechanical properties of products made of porous materials before assembly on the basis of the 3-D model of gas flow through the material.*

**Ключевые слова:** автоматизированный неразрушающий контроль, пористость, газодинамический метод.

**Key words:** computerized non-damaging control, porosity, gas-dynamic method.

**В** настоящее время в машино- и приборостроении одним из наиболее перспективных направлений определения физико-механических свойств наиболее нагруженных и ответственных деталей из пористых материалов перед сборкой является автоматизированный неразрушающий контроль. Используются различные методы неразрушающего контроля, в том числе газодинамический, основанный на исследовании зависимостей физико-механических свойств от особенностей течения газа через материал. Причем при контроле изделий из одного и того же материала целесообразно выявить закономерности течения газа через контролируемое изделие, поэтому для автоматизации данного метода первостепенной задачей является моделирование процесса течения газа.

Пористость – это отношение объема пор в теле к общему объему тела, проницаемость – способность материала пропускать газ или жидкость.

К пористым материалам относятся керамика, металлокерамика, сложные керамические системы, древесина, пластмассы и т.д.

При фильтрации газов в пористой среде различают два основных вида течений: молекулярное и ламинарное. Поскольку переход от одного вида течения к другому не имеет выраженных границ, то в пористой среде рассматривают переходный режим течения от молекулярного к ламинарному режиму. Каждый режим течения в пористой среде обладает характерными особенностями по взаимодействию частиц газа как с поверхностью пор, так и друг с другом.

Автором разработаны способ, устройство определения параметров пористости материалов [1, 2] и программное обеспечение для визуализации процесса на основе газодинамического метода контроля параметров пористости материалов.

Исходными уравнениями для определения параметров пористости являются:

– уравнение Дарси:

$$q = K_{\phi} \frac{\Delta P}{l}; \quad (1)$$

– уравнения Фика для стационарного потока:

$$q = -D \nabla p; \quad (2)$$

– уравнения Фика для нестационарного потока:



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \nabla^2 \rho; \quad (3)$$

– уравнение Лейбензона для изотермической фильтрации:

$$\frac{\partial P^2}{\partial t} = \frac{K_0 P_a}{\Pi \mu} \nabla^2 P^2; \quad (4)$$

– добавочное уравнение

$$q = \frac{V_u}{R_0 T F} \frac{dP_u}{dt}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность газа;

$q$  – поток газа в единицу времени;

$K_\phi$  – коэффициент фильтрации;

$l$  – линейный размер в направлении фильтрации;

$\Delta P$  – перепад давления в материале (потери напора);

$D$  – коэффициент диффузии;

$\nabla P$  – модуль градиента давления в исследуемом материале;

$\nabla \rho$  – модуль градиента концентрации в исследуемом материале;

$K_0$  – коэффициент проницаемости;

$\Pi$  – коэффициент пористости;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости;

$P_a$  – атмосферное давление;

$F$  – площадь материала;

$R_0$  – газовая постоянная;

$V_u$  – объем;

$T$  – температура газа;

$P_u$  – текущее значение давления газа в камере;

$t$  – время.

Для трехмерного случая (движение газа через пористый материал длиной  $l$ , шириной  $b$  и толщиной  $d$ ) уравнения (2)–(4) примут вид:

– уравнения Фика для стационарного потока:

$$q = -D \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z}\right)^2}; \quad (6)$$

– уравнения Фика для нестационарного потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2} \right); \quad (7)$$

– уравнение Лейбензона:

$$\frac{\partial P^2}{\partial t} = \frac{K_0 P_a}{\Pi \mu} \left( \frac{\partial^2 P^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P^2}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

где  $x, y, z$  – координаты.

Решения уравнения (7)  $\rho(x, y, z, t)$  должно удовлетворять следующим граничным и начальным условиям:

$$0 < x < d; 0 < y < b; 0 < z < l; t > 0;$$

$$\begin{aligned} \rho_x(0, y, z, t) &= \rho_x(d, y, z, t) = \\ &= \rho_y(x, 0, z, t) = \rho_y(x, b, z, t) = \\ &= \rho_z(x, y, 0, t) = \rho_z(x, y, l, t) = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho(x, y, z, 0) &= \rho(x, y, z); 0 < x < d; \\ &0 < y < b; 0 < z < l. \end{aligned}$$

После ряда преобразований получаем следующие зависимости для параметров пористости материалов на основе газодинамического метода:

– коэффициент растворимости

$$K_r = \frac{2\mu V_u l t_c (P_u - P_c)}{F^2 \nu P_a^2 (t - t_c)}; \quad (10)$$

– коэффициент фильтрации

$$K_\phi = \frac{2\mu V_u l (P_u - P_c)}{F \nu P_a^2 (t - t_c)}; \quad (11)$$

– коэффициент пористости

$$\Pi = \frac{2V_u l t_c (P_u - P_c)}{F^2 P_a (t - t_c)}; \quad (12)$$

– коэффициент газопроницаемости

$$K_o = \frac{2\mu V_u l (P_u - P_c)}{FP_a^2 (t - t_c)}; \quad (13)$$

– коэффициент диффузии

$$D = \frac{V_u l (P_u - P_c)}{FP_a (t - t_c)}; \quad (14)$$

где  $P$  и  $t_c = \frac{db}{2D}$  или  $t_c = \frac{4db\mu}{11K_o P_a}$  – давление и вре-

мя в измерительной камере, соответствующие переходу от кнудсеновского к ламинарному режиму течения газа;

$t_u$  – текущее значение времени,  $t_u > t_c$ ;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости.

Для реализации данного способа разработана экспериментальная установка (рис. 1) автоматизированного неразрушающего контроля физико-механических свойств по коэффициентам пористости, проницаемости, фильтрации, диффузии, растворимости газа при прохождении через контролируемый материал.

Устройство содержит ячейку, разделенную испытуемым образцом на рабочую (слева) и измерительную (справа) камеры. Вентили 1 и 2 соединяют камеры с вакуумным насосом, вентиль 3 – рабочую камеру с атмосферой. На измерительной камере установлены датчик дав-

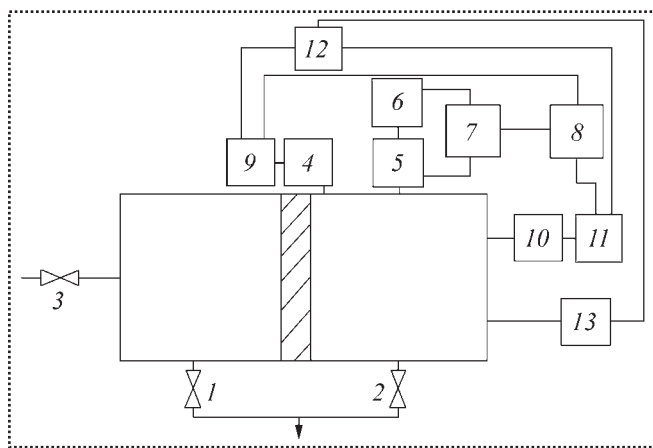


Рис. 1. Схема устройства для определения параметров пористости и физико-механических свойств материалов

ления 4 и датчик измерения приращения давления 5, один выход которого соединен с запоминающим устройством 6, а второй – с выходом запоминающего устройства с блоком сравнения 7.

Выход блока сравнения подключен ко входу коммутатора 8. Первый и второй выходы коммутатора соединены с запоминающими устройствами давления 9 и времени 11, подключенными к выходам датчика давления 4 и времени 10. Датчики времени 10 и температуры 13 также установлены на измерительной емкости. Выходы датчика температуры и запоминающих устройств давления и времени подключены к ЭВМ 12, которая позволяет определить из уравнений численные значения коэффициентов фильтрации, проницаемости, диффузии и растворимости.

После вакуумирования измерительной и рабочей камер и последующего соединения рабочей камеры с атмосферой давление в измерительной камере начнет медленно возрастать, так как воздух из рабочей камеры через образец проникает в измерительную.

Определение  $P_c$  и  $t_c$  осуществляется следующим образом. Датчик измерения приращения давления за определенный промежуток времени регистрирует приращение давления и передает его запоминающему устройству. Когда датчик зарегистрирует приращение давления за следующий промежуток времени, блок сравнивает этот результат с предыдущим, находящимся в памяти запоминающего устройства.

В начальный период времени эти приращения не будут равны и блок сравнения зарегистрирует, что последующее приращение давления больше предыдущего, а в момент времени  $t_c$  приращения давления уравниваются и в дальнейшем будут равными.

В этом случае блок сравнения зарегистрирует равенство приращений давления в измерительной камере в момент времени  $t_c$  и на коммутатор поступит сигнал, который включит запоминающие устройства датчиков давления и времени. Запоминающие устройства 9 и 11 зафиксируют численные значения давле-

ния  $P_c$ , времени  $t_c$  и передадут эти данные на вход ЭВМ. В самом начале эксперимента на вход ЭВМ было уже передано с датчика температуры численное значение температуры в измерительной камере.

Следующее приращение давления в измерительной камере устройства окажется равным предыдущему. Поэтому блок сравнения снова передаст сигнал коммутатору, а коммутатор – запоминающим устройствам датчиков давления и времени. Последние зафиксируют значение давления  $P_u$  и времени  $t_u$ , где  $t_u > t_c$ ,  $P_u > P_c$ . После этого запоминающие устройства 9 и 11 передадут эти данные на вход ЭВМ.

Так как временной интервал приращения давления в измерительной камере очень мал, то коммутатор можно настроить таким образом, чтобы сигнал о регистрации запоминающими устройствами давления  $P_u$  и времени  $t_u$  был осуществлен через более длительный про-

межуток времени. Для этого в коммутатор можно встроить реле времени, и сигнал к ЭВМ поступит с задержкой.

Данные о номинальном объеме измерительной камеры  $V_u$ , молярной массе газа  $M$ , площади  $F$  образца, разделяющего камеры, атмосферного давления  $P_a$ , газовой постоянной  $R_0$ , коэффициенте кинематической вязкости и толщине образца введены в ЭВМ заранее, после чего она по разработанной программе определяет параметры пористости по формулам (10)–(14).

Для ускорения процесса контроля были проведены эксперименты на разработанной установке и получены математические зависимости параметров пористости, а затем разработано программное обеспечение, позволяющее провести автоматизированную обработку данных процесса контроля.

Разработанное программное обеспечение (рис. 2) основано на первоначальном вводе ис-

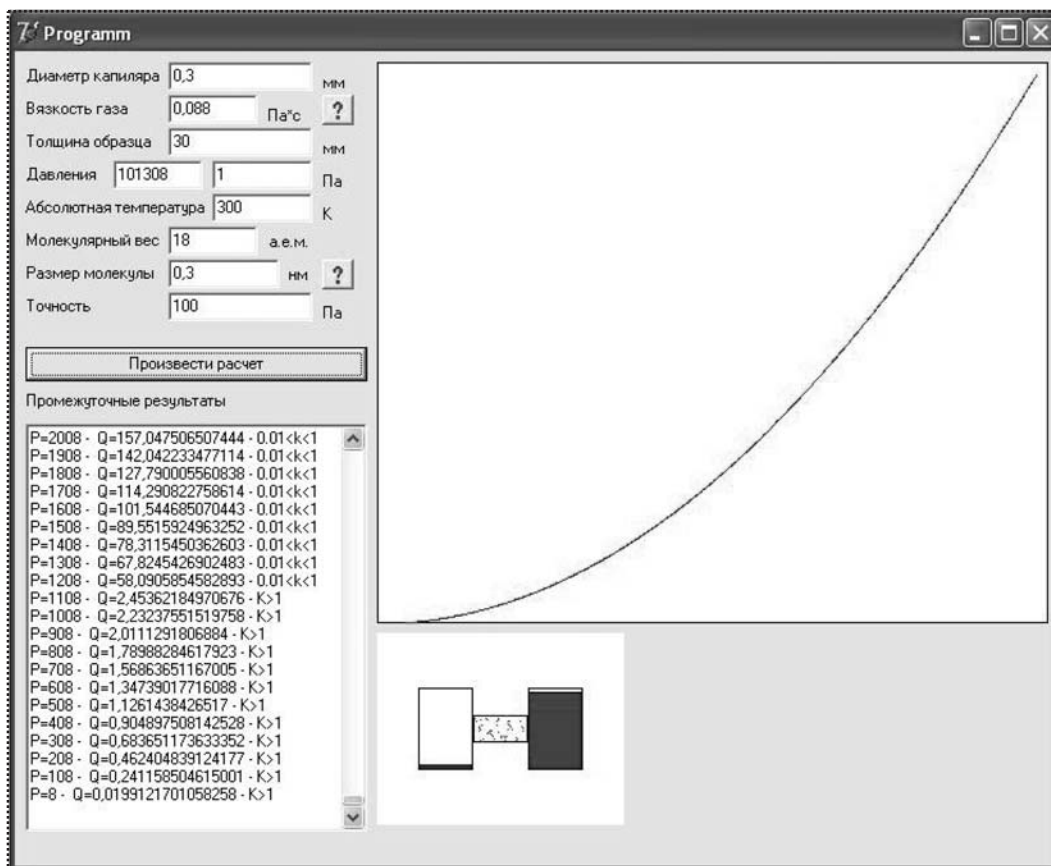


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения для обработки результатов процесса контроля





ходных данных о структуре контролируемого материала, форме и размерах изделия, параметрах используемого газа, погрешности измерительного устройства. После ввода исходной информации запускается процедура визуализации процесса перетекания газа из рабочей емкости устройства в измерительную через контролируемый материал, проводится автоматический расчет изменения давления газа в камерах с течением времени и строится графическая зависимость давления газа от времени, на которой наблюдаются участки кнудсеновского и ламинарного режимов течения газа. Предлагаемое программное обеспечение разработано в среде Delphi7.

Вводя в программу информацию о различных газах и контролируемых материалах, можно определить наиболее оптимальный по скорости фильтрации газа и точности измерений способ контроля конкретного изделия газодинамическим методом.

Сравнение экспериментальных данных и полученных в результате работы программы показало, что погрешность последних составляет порядка 20 % и незначительно влияет на результат контроля, зато ускоряет его проведение и сокращает технологический процесс изготовления изделий перед сборкой.

По полученным параметрам пористости на основе существующих зависимостей определяют физико-механические свойства изделий из пористых материалов:

– предел прочности на растяжение [3]

$$\sigma_{\text{в}} = \sigma_{\text{вк}} \frac{1-1,5\Pi}{1+1,5\beta\Pi}; \quad (15)$$

– коэффициент теплопроводности [4]

$$\lambda = \lambda_{\text{к}} (1-1,7\Pi); \quad (16)$$

– модуль упругости [5]

$$E = E_{\text{к}} (1-\Pi)^{m_1}, \quad (17)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  и  $\sigma_{\text{вк}}$  – предел прочности соответственно пористого и непористого материалов;

$\beta$  – параметр, определяющий неоднородность напряжений по сечению, обусловленную неравномерным распределением пор в площади сечения;

$\lambda$  и  $\lambda_{\text{к}}$  – теплопроводность соответственно пористого и непористого материалов;

$E$  и  $E_{\text{к}}$  – модуль упругости соответственно пористого и непористого материалов;

$m_1$  – константа.

*Таким образом, разработанные способ, устройство и программное обеспечение позволяют провести автоматизированную обработку результатов контроля параметров пористости, а затем и физико-механических свойств наиболее нагруженных и ответственных деталей из пористых материалов перед сборкой и выявить наиболее оптимальные условия контроля для конкретно выбранного изделия.*

#### Библиографический список

1. **Способ** определения параметров пористости материалов: Патент РФ № 2305820, МКИ<sup>3</sup> G01N15/08 // Ю.З. Житников, А.Н. Иванов, Ю.Н. Матросова, А.Е. Матросов. – Б.И. № 25, 2007 г.
2. **Матросова Ю.Н.** Разработка устройства автоматизированного неразрушающего контроля физико-механических свойств пористых материалов // Вооружение. Технология. Безопасность. Управление / Мат-лы IV Межотраслевой конференции с международным участием аспирантов и молодых ученых. В 3 ч. Ч. 1. – Ковров: КГТА, 2009. С. 128–133.
3. **Ермаков С.С., Вязников Н.Ф.** Металлокерамические детали в машиностроении. – Л.: Машиностроение, 1975. 232 с.
4. **Белов С.В.** Пористые проницаемые материалы. Справ. изд. / под ред. С.В. Белова. – М.: Металлургия, 1987. 335 с.
5. **Вязников Н.Ф., Ермаков С.С.** Металлокерамические материалы и изделия. – Л.: Машиностроение, 1967. 224 с.

УДК 621.382

**Н.А. Ветрова**, ассистент, **С.В. Хныкина**, канд. техн. наук, **В.Д. Шашурин**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой "Технологии приборостроения" (МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: s.hnykina@mail.ru

## К вопросу о прогнозировании качества смесителей радиосигналов на основе РТД на этапе их сборки

Показана актуальность применения резонансно-туннельного диода (РТД) в составе смесителей радиосигналов для современных радиоэлектронных систем связи. Исследованы процессы, влияющие на возникновение отказов смесителей на основе резонансно-туннельного диода с составом слоев гетероструктуры GaAs–AlGaAs, а также экспериментальные результаты, подтверждающие физические процессы их возникновения.

The application urgency of the resonant tunneling diode as a part of radio signals mixers for modern radio-electronic communication systems is shown. The processes influencing on refusals of mixers based on the resonant tunneling diode with layers of heterostructure GaAs–AlGaAs, and also the experimental results confirming physical processes of their occurrence are investigated.

**Ключевые слова:** нанотехнологии, надежность, смеситель радиосигналов, резонансно-туннельный диод.

**Key word:** nanotechnology, reliability, mixer of radio signals, resonant tunneling diode.

Современное развитие радиоэлектронных систем связи (спутниковой связи, системы телекоммуникации, сотовой телефонной связи, системы беспроводной связи и т.д.) выдвигает такие требования к ним, как миниатюризация, улучшение технических характеристик (повышение быстродействия, снижение энергопотребления, уменьшение искажений сигналов и т.д.), увеличение функциональных возможностей при росте рабочих частот [1], повышение ка-

чества и надежности, снижение стоимости (Федеральная целевая программа "Развитие электронной компонентной базы и радиоэлектроники" на 2008–2015 годы).

В общем случае структура системы связи выглядит так, как показано на схеме, приведенной на рис. 1.

Дальнейшее совершенствование систем связи предполагает улучшение их технических характеристик, а именно увеличение объема и скорости передачи данных, что требует повышения пропускной способности систем связи. Это заставляет не только переходить на более высокие рабочие частоты, но и искать пути расширения полосы пропускания узлов приемных и передающих устройств.

Одним из важных узлов, во многом определяющих характеристики системы связи в целом, является нелинейный преобразователь сигнала – модулятор в передающем тракте и смеситель в приемном [1]. Существенное улучшение потребительских характеристик систем связи достигается за счет принципа преобразования частоты принимаемого сигнала – переноса его в частотную область, где он

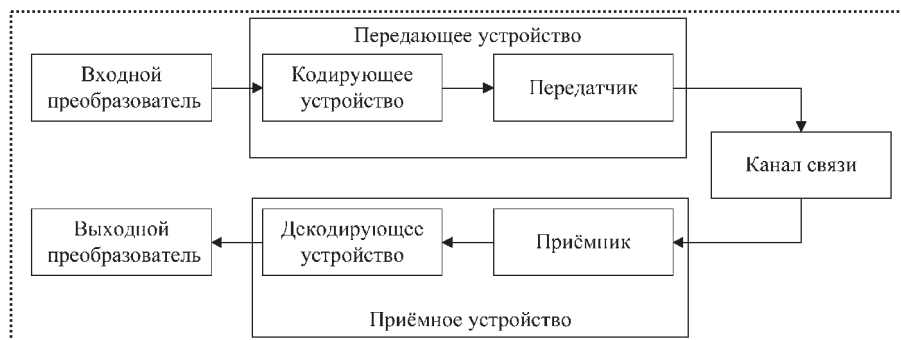


Рис. 1. Структурная схема обобщенной системы связи



может быть обработан с наибольшей эффективностью.

При помощи смесителя принятый сигнал сначала переносится в область более низких частот, а затем демодулируется и передается дальше, при этом необходимо, чтобы сигнал был преобразован с минимальными искажениями. Таким образом, от качества преобразования сигнала смесителем во многом зависят выходные параметры системы связи.

В спектре выходного сигнала смесителя кроме полезной частоты возникает множество интермодуляционных составляющих, уровень которых зависит от конструкции смесителя, соотношения частот и амплитуд входного сигнала и сигнала гетеродина, а также формы вольтамперной характеристики (ВАХ) нелинейного элемента, на основе которого выполнен смеситель.

Традиционно смесители строят на основе диода с барьером Шоттки (ДБШ), который имеет экспоненциальную ВАХ. Устранение паразитных продуктов частотного преобразования осуществляется за счет включения в цепь смесителя частотных фильтров, что усложняет его схему, увеличивает габариты, повышает цену и снижает надежность.

Кардинальным способом улучшения технических характеристик смесителей радиосигналов является применение нелинейного элемента с ВАХ, отличной от экспоненты, что позволяет уменьшить количество интермодуляционных составляющих в спектре выходного сигнала и в результате расширить полосу рабочих частот без применения фильтров [2].

Переход на более высокие рабочие частоты (для увеличения объема передаваемых данных) заставляет искать новые материалы полупроводниковых приборов, совершенствовать их конструкцию и технологию производства. На работу узлов электронных устройств сильное влияние оказывают паразитные емкости и индуктивности, и переход на более высокие рабочие частоты заставляет уменьшать активную область прибора, размеры выводов и

корпусов с целью минимизации паразитных емкостей и индуктивностей.

Однако при переходе на более высокие частоты (до ТГц) использование ДБШ уже неэффективно, поскольку функционирование на основе баллистического пролета электронов не позволяет увеличить быстродействие, а уменьшение активной области прибора приводит к существенному снижению максимально допустимой мощности и напряжения. В такой ситуации выход находят в использовании полупроводниковых приборов, функционирующих на основе квантоворазмерных эффектов, а именно резонансного туннелирования.

Таким перспективным техническим решением является РТД с поперечным токопереносом на базе многослойных гетероструктур  $A_3B_5$ . В общем виде РТД имеет ВАХ вида

$$I_d = a(U_d)^x,$$

где  $a$  – коэффициент;

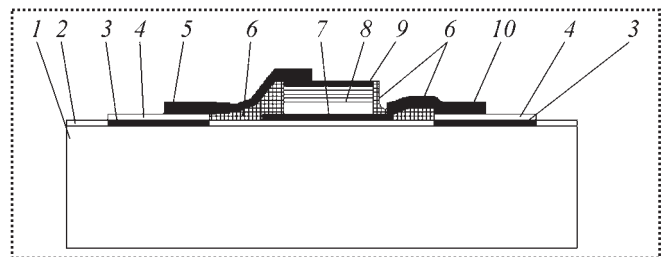
$U_d$  – напряжение, приложенное к РТД;

$I_d$  – ток, протекающий через РТД;

$x$  – степень нелинейности ВАХ [2].

Конструкция РТД представлена на рис. 2.

Квантоворазмерный эффект резонансного туннелирования сохраняется при комнатной и повышенной температурах. Изменяя параметры слоев гетероструктуры РТД (толщину, химический состав), толщина которых составля-



**Рис. 2. Конструкция РТД:**

1 – полуизолирующая GaAs подложка;

2 –  $n^+$ - слой;

3 – участки слоя с уничтоженной электропроводностью;

4 – контактные площадки;

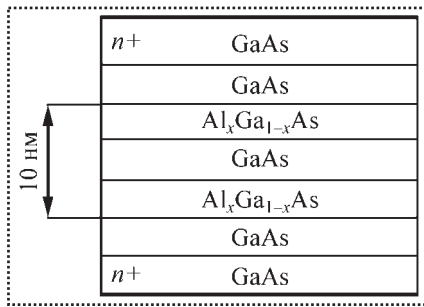
5, 10 – воздушные мостики;

6 – полиимидный слой;

7 и 9 – нижний и верхний выводы диода;

8 – гетероструктура

Рис. 3. Гетероструктура РТД



ет несколько нанометров (рис. 3), можно управлять формой его ВАХ и создавать РТД с оптимальной ее формой для конкретного вида нелинейного преобразования (рис. 4). Так, в случае смесителя радиосигналов в зависимости от параметров гетероструктуры РТД его ВАХ может быть выполнена квадратичной, кубической и др. [2].

Технологический процесс изготовления узла смесителя радиосигналов на базе РТД включает в себя изготовление самого РТД, реализацию пассивных элементов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей), формирование контактов, реализацию межсоединений и корпусирование. При этом на одной подложке в едином технологическом цикле выполняется формирование гетероструктуры для всех РТД (до 1000 шт.).

Необходимо отметить, что параметры слоев гетероструктуры (толщина, химический состав, дефектность) образцов РТД и, следовательно, его ВАХ отличаются в зависимости от их расположения на подложке, а значит, и выходные электрические параметры смесителя. Технологические операции изготовления пассивных элементов, межсоединений и корпуси-

рования смесителя отработаны и известны давно.

Таким образом, РТД является перспективным полупроводниковым элементом, применение которого в составе нелинейного преобразователя радиосигналов позволит повысить показатели качества назначения систем связи.

Отметим, что качество радиоэлектронных систем во многом определяется их надежностью. При этом достижение заданной надежности связано с возможностью достоверно определять численные значения показателей надежности всех функциональных модулей, входящих в рассматриваемую систему, и осуществлять комплекс мероприятий по управлению данным параметром на всех этапах жизненного цикла.

Основная проблема расчета надежности смесителей радиосигналов на основе РТД связана с определением численных значений ее показателей. Наличие в конструкции РТД гетероструктуры определяет возможность высокого уровня его деградации в процессе эксплуатации.

Рассмотрим типовой смеситель радиосигналов на основе РТД. В общем случае можно считать, что смеситель радиосигналов состоит из РТД и пассивной части. Вероятность безотказной работы смесителя находят по формуле

$$P = P_{\text{РТД}} P_{\text{пасс}},$$

где  $P_{\text{РТД}}$  — вероятность безотказной работы РТД;

$P_{\text{пасс}}$  — вероятность безотказной работы пассивной части смесителя (плата, элементы соединений, резисторы, конденсаторы и т.д.).

Показатели надежности элементов пассивной части смесителя радиосигналов определяют на основе справочных данных.

Учитывая, что гетероструктура РТД определяет его ВАХ, которая влияет на выходные

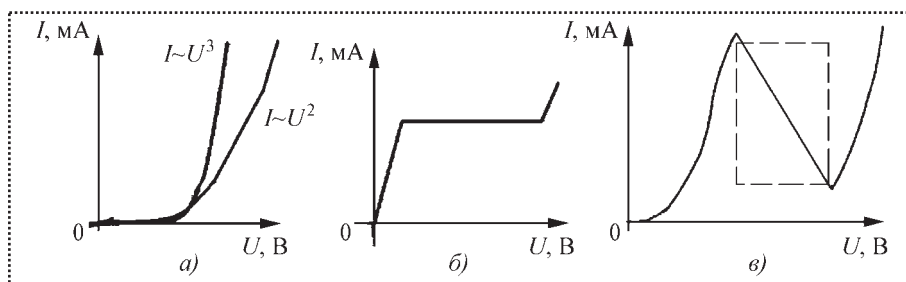


Рис. 4. Оптимальные формы ВАХ для нелинейных преобразователей сигналов: а — для смесителей; б — для модуляторов и демодуляторов; в — для генераторов





эксплуатационные параметры смесителя радиосигналов, а также малую толщину слоев гетероструктуры РТД, можно предположить, что на надежность смесителя радиосигналов будет оказывать наиболее сильное влияние надежность гетероструктуры.

Для определения параметров гетероструктуры РТД проанализируем уравнение Цу–Есаки [3]:

$$J(U) = C \int_0^{\infty} Z(E, U) E_f F(E, U) dE, \quad (1)$$

где  $J(U)$  – плотность тока;

$C$  – константа, которая задает наибольшую теоретическую плотность тока:  $C = em_e/2\pi^2\hbar^3 \approx 2 \cdot 10^9$  (А/см<sup>2</sup>)/эВ<sup>2</sup>, здесь  $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $m_e \approx 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг – его масса;  $\hbar \approx 1,05 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – редуцированная постоянная Планка;

$Z(E, U)$  – вероятность перехода электрона через квантоворазмерную область (прозрачность гетероструктуры);

$E_f$  – энергия Ферми;

$F(E, U)$  – вероятность нахождения электрона в приэлектродных слоях;

$E$  – кинетическая энергия движения электрона поперек слоев гетероструктуры;

$U$  – напряжение, подаваемое на РТД.

Рассмотрим зависимость величины  $E_f$  и функций  $F(E, U)$ ,  $Z(E, U)$ , входящих в уравнение (1), от параметров конструкции РТД.

Известно, что положение уровня Ферми связано с концентрацией легирующей примеси в приэлектродных слоях гетероструктуры РТД, поскольку это приводит к увеличению концентрации носителей заряда. Положение уровня Ферми можно определить по формуле

$$E_f = \frac{\hbar}{2m_n} (3\pi^2 N_D^2)^{2/3}, \quad (2)$$

где  $m_n = 0,067m_e$  – эффективная масса электрона;

$N_D$  – концентрация легирующей примеси.

Таким образом, величина  $E_f$  зависит от концентрации легирующей примеси.

Следующий параметр уравнения (1) – вероятность нахождения электрона в приэлектродных слоях, которая определяется из уравнения

$$F(E, U) = 1/(\beta E_f) \ln \left[ \frac{1 + \exp(\beta(E_f - E))}{1 + \exp(\beta(E_f - E - U))} \right], \quad (3)$$

где  $\beta = 1/(kt)$ ;

$k$  – постоянная Больцмана;

$t$  – температура окружающей среды, К.

Таким образом, функция  $F(E, U)$ , как и величина  $E_f$ , зависит от концентрации легирующей примеси и температуры эксплуатации РТД.

Для вычисления другого параметра уравнения (1) – прозрачности гетероструктуры  $Z(E, U)$  необходимо решить уравнение Шредингера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\partial^2}{\partial l^2} \psi(l) + Y(l)\psi(l) = E\psi(l), \quad (4)$$

где  $\psi(l)$  – волновая функция;

$Y(l)$  – потенциальная энергия электрона;

$l$  – толщина гетероструктуры РТД.

Гетероструктура РТД является сочетанием узкозонного материала GaAs и широкозонного  $Al_xGa_{1-x}As$ . Известно, что высота потенциального барьера для электрона определяется молярной долей  $x$  Al в слое  $Al_xGa_{1-x}As$  (рис. 5), а толщины барьерных слоев и слоя ямы – соответственно толщинами слоев  $Al_xGa_{1-x}As$  и GaAs:

$$Y(l) = \begin{cases} 0 & \text{по всей толщине слоя GaAs,} \\ x & \text{по всей толщине слоя } Al_xGa_{1-x}As. \end{cases} \quad (5)$$

Из теории дифференциальных уравнений известно, что решение уравнения (5) необходимо искать в виде

$$\psi_n(l) = A_n e^{ik_n l} + B_n e^{-ik_n l},$$

где  $k_n = \frac{\sqrt{2m_e - (E - Y(l_n))}}{\hbar}$ ;

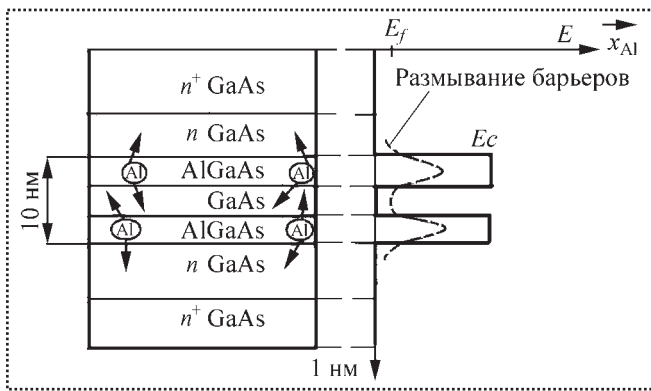


Рис. 5. Влияние диффузии алюминия на изменение формы и высоты потенциального барьера гетероструктуры РТД:  
 $E_c$  – край зоны проводимости

$A_n$  и  $B_n$  – коэффициенты.

Уравнение Шредингера имеет такое решение, когда функция  $Y(l)$  постоянна на рассматриваемом интервале, поэтому весь потенциальный барьер разбивается на  $n$  участков  $l_n$ .

Из условий непрерывности и гладкости функции  $\psi$  следует, что на границе интервалов должны выполняться следующие условия:

$$\psi(l_{n-})_+ = \psi(l_{n+})_+;$$

$$\psi'(l_{n-})_+ = \psi'(l_{n+})_+;$$

исходя из которых решение уравнения (4) можно найти через матрицу перехода  $\hat{M}_n$ :

$$\begin{pmatrix} A_n \\ B_n \end{pmatrix} = \hat{M}_n \begin{pmatrix} A_{n+1} \\ B_{n+1} \end{pmatrix}.$$

Коэффициент прозрачности

$$Z = \frac{|A_{n+1}|^2}{|A_n|^2}.$$

Таким образом, на основании соотношения (5) прозрачность гетероструктуры  $Z(E, U)$  зависит от толщины ее слоев и их химического состава.

Проведенный анализ уравнения (1) позволяет заключить, что ВАХ РТД согласно уравнениям (2), (5) зависит от химического состава

и толщин слоев конкретной гетероструктуры, а также от температуры эксплуатации РТД.

Для исключения влияния диффузии материалов контакта на физико-химические свойства тонких слоев гетероструктуры и ВАХ РТД в составе гетероструктуры имеются специальные приэлектродные слои толщиной до 1 мкм.

Учитывая, что толщины барьерных слоев  $Al_xGa_{1-x}As$  и слоя ямы гетероструктуры GaAs РТД находятся в наноразмерном диапазоне, можно предположить, что диффузия внутри резонансно-туннельной структуры может являться тем определяющим процессом, который модифицирует физико-химические свойства гетероструктуры и, следовательно, изменяет условия токопереноса в РТД (ВАХ), таким образом влияя на изменение выходных электрических параметров смесителя радиосигналов (см. рис. 5). Для определения элемента, имеющего наибольшую скорость диффузии в гетероструктуре состава GaAs –  $Al_xGa_{1-x}As$  при температуре эксплуатации, воспользуемся уравнением Аррениуса:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{kt}\right), \quad (6)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии материала;

$D_0$  – фактор диффузии (постоянная, численно равная коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре),  $cm^2/s$ ;

$E_a$  – энергия активации диффузии, эВ;

$k$  – постоянная Больцмана;

$t$  – температура, К.

Результаты расчета показали, что в широком интервале температур (до 730 °С) коэффициент диффузии Al значительно превышает (на несколько порядков) коэффициенты диффузии других материалов (Ga, As, Si). Далее в качестве доминирующего процесса деградации гетероструктуры рассматривается диффузия Al из барьерных слоев  $Al_xGa_{1-x}As$  под действием внешних факторов в соседние слои гетероструктуры GaAs.

Для оценки значимости данного процесса разработана модель, позволяющая определять



Название слоя	№ слоя	Толщина слоя, мкм	Основной материал	Легирующий материал	Концентрация легирующей примеси, 1/см <sup>3</sup>
Верхний контакт	11	1,0000	Au/Ni/AuGe	–	–
Приконтактный слой	10	0,3000	GaAs	Si	2·10 <sup>18</sup>
Переходный слой	9	0,0500	GaAs	Si	2·10 <sup>17</sup>
Спейсер	8	0,0021	GaAs	–	–
Барьерный слой	7	0,0029	AlAs	–	–
Слой ямы	6	0,0049	GaAs	–	–
Барьерный слой	5	0,0029	AlAs	–	–
Спейсер	4	0,0021	GaAs	–	–
Переходный слой	3	0,0500	GaAs	–	–
Переходный слой	2	1,0000	GaAs	Si	2·10 <sup>17</sup>
Подложка	1	10,0000	GaAs	Si	2·10 <sup>18</sup>
Нижний контакт	12	1,0000	Au/Ni/AuGe	–	–

надежность нанодиода (по постепенным отказам) в зависимости от интенсивности протекания диффузионных процессов в его гетероструктуре. Исходными данными являются параметры слоев гетероструктуры (толщина, состав), температура эксплуатации, допустимое значение выходного электрического параметра смесителя, изготовленного на основе нанодиода.

Системно модель объединяет три расчетных модуля:

– *модуль 1* предназначен для расчета исходя из конструкторско-технологических параметров гетероструктуры нанодиода (толщины и состава слоев) и изменения состава слоев в зависимости от времени и температуры эксплуатации изделия в результате протекания диффузионных процессов;

– *модуль 2* предназначен для моделирования ВАХ нанодиода, имеющего в своем составе полупроводниковые структуры с различным составом слоев (GaAs, AlGaAs и др.);

– *модуль 3* предназначен для оценки изменения электрических параметров смесителя радиосигналов в зависимости от дрейфа ВАХ нанодиода.

Разработанная модель позволяет оценить влияние диффузионных процессов в гетерост-

руктуре нанодиода на характер изменения высоты и формы ее потенциального барьера и связанное с этим изменение ВАХ нанодиода и электрических параметров прибора и, следовательно, определить прогнозируемую наработку до отказа нанодиода и прибора по выбранным эксплуатационным параметрам.

Поскольку критерием отказа прибора является допустимое значение его выходного параметра, то надежность нанодиода и смесителя можно оценивать, например, по коэффициенту потерь преобразования  $K$ .

Исходный состав слоев гетероструктуры РТД представлен в таблице.

На рис. 6 представлены результаты определения надежности рассматриваемого смесителя по потерям преобразования  $K$ . Влияние деградации гетероструктуры на другие эксплуатационные параметры смесителя (динамический диапазон, точку компрессии) являются не столь заметными.

Как следует из полученных результатов, средняя наработка до отказа смесителя радиосигналов непосредственно связана с дрейфом ВАХ РТД, определяемая в свою очередь процессом диффузии Al в гетероструктуре. При этом изменение температурного режима эксплуатации смесителя радиосигналов приводит

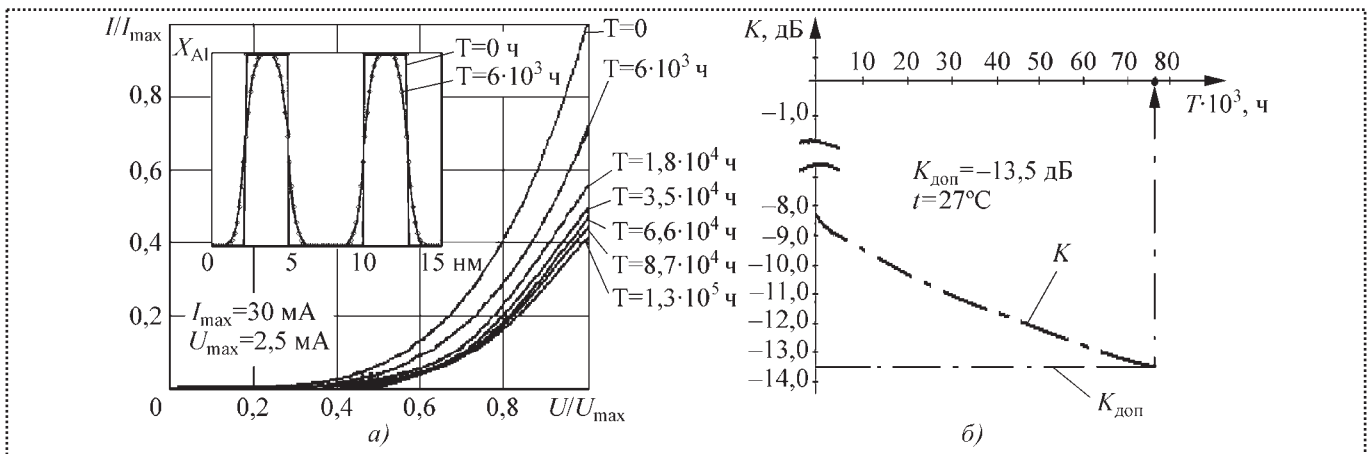


Рис. 6. Изменение ВАХ РТД (а) и потеря преобразования смесителя радиосигналов (б) во времени

к существенному изменению сроков  $T$  функционирования изделия. В частности, для рассматриваемого смесителя при  $t = 27^\circ\text{C}$   $T = 7,6 \cdot 10^4$  ч, при  $t = 40^\circ\text{C}$   $T = 5,8 \cdot 10^4$  ч, а при  $t = 60^\circ\text{C}$   $T = 4,5 \cdot 10^4$  ч.

Необходимо отметить, что при изготовлении гетероструктур имеет место определенный разброс их функционально-технологических показателей – толщин барьерных слоев и слоя ямы  $h$ , молярной доли алюминия в барьерных слоях  $x$ , концентрации легирующей примеси  $n$ . Производители лишь ориентировочно указывают на возможные границы разброса для всей партии, например,  $\Delta h = 5 \dots 10\%$ ,  $\Delta x = 6 \dots 10\%$ ,  $\Delta n = 5 \dots 10\%$ .

Между тем результаты моделирования показали, что данный технологический фактор существенно влияет на надежность смесителя радиосигналов. На рис. 7 приведены результаты моделирования по нахождению предельно допустимых границ изменения параметра  $K$  смесителя, определяемых предельными отклонениями  $\Delta h$ ,  $\Delta x$ ,  $\Delta n$ . Разброс наработки до отказа смесителя радиосигнала составил от  $6,5 \cdot 10^4$  до  $8,7 \cdot 10^4$  ч.

Для проверки характера протекания процесса деградации и адекватности модели были проведены ускоренные испытания образцов РТД в тепловой камере и измерены их ВАХ, а также выходные электрические параметры смесителя. Для этого использовали измери-

тельный комплекс, который включал в себя цифровой источник питания, микрондовое устройство (на базе микроскопа) и персональный компьютер.

Для смесителя радиосигналов отличие теоретических значений потерь преобразования  $K$  от экспериментальных составляет 4...9 %, для

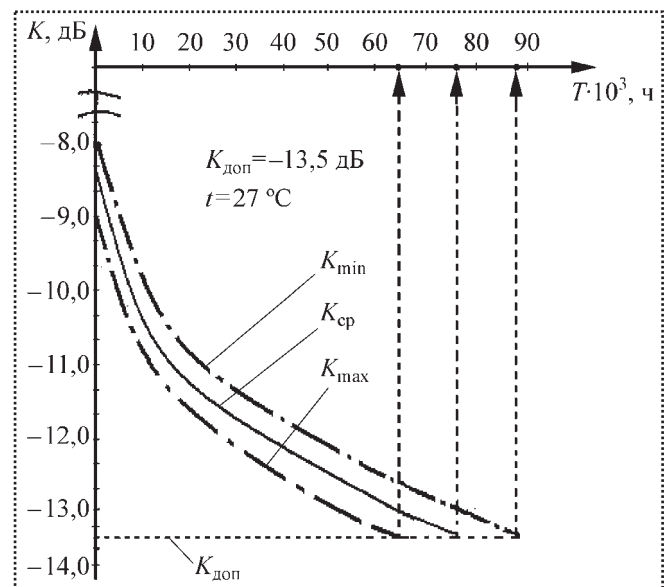


Рис. 7. Определение разброса наработки до отказа смесителя радиосигналов с учетом технологических погрешностей изготовления гетероструктуры РТД:

$K_{cp}$  – потери преобразования смесителя радиосигналов при номинальных параметрах слоев гетероструктуры РТД;  $K_{min}$ ,  $K_{max}$  – границы разброса потерь преобразования смесителя радиосигналов при предельных значениях технологических погрешностей изготовления гетероструктуры РТД ( $\Delta h = 10\%$ ;  $\Delta x = 10\%$ ;  $\Delta n = 10\%$ )





РГД отличие теоретических значений максимального тока от экспериментальных находится в пределах 5...18 %. Данное обстоятельство позволяет утверждать, что разработанная модель позволяет вполне адекватно выполнять расчет средней наработки до отказа смесителя радиосигналов до этапа его сборки.

Таким образом, проведенные теоретические исследования позволили установить, что формирование постепенных отказов смесителей радиосигналов непосредственно связано с диффузионной деградацией гетероструктур РГД. Разработанная модель позволяет исходя из заданных характеристик гетероструктур рассчитать среднюю наработку до отказа всей партии РГД и далее смесителей радиосигналов с учетом температурного режима эксплуатации.

Вместе с тем из полученных данных можно заключить, что основная проблема определения численных значений показателей надежности данных смесителей радиосигналов связана с оценкой надежности его базового модуля – РГД. При этом надо иметь в виду, что наличие в конструкции РГД гетероструктуры определяет возможность высокого уровня его деградации в процессе эксплуатации. Интенсивность данного процесса зависит от параметров гетероструктуры, информация о которых является неполной.

В данных условиях представляется актуальной задача разработки контрольной операции, позволяющей оценить групповую и индивидуальную надежность смесителей радиосигналов на основе РГД с учетом особенностей параметров гетероструктуры. Общая структура данной технологической операции должна состоять из двух модулей: расчетного и экспериментального.

*Расчетный модуль* позволяет осуществлять предварительную оценку надежности для партии РГД. Исходными данными для расчета являются параметры слоев гетероструктуры (толщины и состав слоев) РГД, их технологических отклонений, а также предельные значения выходных электрических параметров смесителя радиосигналов. На выходе исходя из физических закономерностей старения гетероструктуры строится прогноз средней наработки до отказа смесителя радиосигналов.

*Второй модуль – технологические испытания.* Их задача – непосредственная экспериментальная оценка индивидуальной надежности каждого конкретного РГД в партии и их групповой надежности, а также выявление РГД с предельно низкими значениями надежности. В основу испытаний заложен принцип искусственного старения изделия за счет воздействия температурного фактора (ускоренные испытания).

*Таким образом, определение надежности изделия требует точных данных по технологическим погрешностям изготовления гетероструктуры, которые можно получить при введении перед сборкой смесителя дополнительной контрольной операции РГД, основанной на его искусственном "старении" за счет воздействия температурного фактора.*

#### Библиографический список

1. **Гуртов В.** Твердотельная электроника: Учебное пособие, 2-е изд. – М.: Техносфера, 2005. 408 с.
2. **Иванов Ю.А.** Исследование направлений применения резонансно-туннельного диода в интегральных схемах СВЧ диапазона // Микроэлектроника. – 1996. Т. 25. № 4. С. 249–258.
3. **Нанотехнологии** в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М.: Техносфера, 2005. 448 с.



УДК 621.43.001.573

**А.А. Макушин, Е.В. Зубков, канд-ты техн. наук,**  
**А.А. Новиков** (Камская государственная инженерно-экономическая академия)  
E-mail: alma9494@mail.ru

## Оптимизация процесса испытания двигателей внутреннего сгорания

*Рассмотрены аспекты применения CALS-технологий в области автоматизации испытаний двигателей внутреннего сгорания, а также графический язык описания технологий испытаний, позволяющий повысить эффективность их проектирования. Разработана методика проектирования технологий испытаний, основанная на использовании узловых точек.*

*The aspects of CALS-technologies using in field of automation of internal combustion engines testing are considered. The graphic language of description of testing technologies is considered. This language allows raising efficiency of designing. The method of designing of testing technologies based on node points using has been worked out.*

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, испытание, стенд, жизненный цикл, автоматизированная система испытаний, информационные технологии, CALS-технология, технология испытания, графический язык, грамматические правила, узловая точка.

**Key words:** internal combustion engine, test, test bench, life cycle, automated testing system, information technologies, CALS-technology, testing technology, graphic language, grammar rules, node point.

Использование информационных технологий позволяет повысить качество продукции машиностроения, ускорить процесс ее проектирования и производства. CAD/CAM/CAE-системы обеспечивают информационную поддержку на этапах технологического и конструкторского проектирования изделий. Дальнейшим их развитием является интеграция существующих систем и создание единого информационного пространства, объединяющего автоматизированные системы, предназначенные как для эффективного решения инженерных задач, так и для планирования и управления производством и ресурсами предприятия.

CALS-технологии (Continuous Acquisition and Life cycle Support – непрерывная информационная поддержка поставок и жизненного цикла) подразумевают современный подход к проектированию и производству высокотехнологичной и наукоемкой продукции, заключающийся в использовании компьютерной техники и современных информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделия. Такие технологии обеспечивают единые образные способы управления процессами и взаимодействия всех участников этого цикла (заказчиков, поставщиков и производителей продукции, эксплуатационного и ремонтного персонала) и реализуются в соответствии с требованиями системы международных стандартов, регламентирующих правила указанного взаимодействия, преимущественно посредством электронного обмена данными [1].

Рассмотрим возможность применения CALS-технологий в области испытаний двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

**Автоматизация испытаний.** Требования, предъявляемые к качеству и эффективности испытаний, постоянно возрастают [2–4]. Заключается это, прежде всего, в увеличении количества измеряемых и вычисляемых параметров, повышении точности и частоты их измерения, получении более точных характеристик двигателя. Дополнительную сложность для испытания двигателей представляет наличие широкой номенклатуры выпускаемых моделей и их модификаций, что затрудняет унификацию оборудования испытательных стендов.

Одно из лучших решений по удовлетворению данных требований – применение на испытательных стендах автоматизированных



систем испытаний (АСИ) двигателей. АСИ позволяет повысить качество и эффективность конструкторских разработок, сократить сроки доводки и усовершенствования двигателей при снижении себестоимости проведения стендовых испытаний [5].

АСИ представляет собой совокупность программных и аппаратных средств, используемых для проведения испытаний. Она включает в себя средства проектирования технологий и проведения испытаний и анализа полученных результатов. Таким образом, АСИ обеспечивает информационную поддержку на начальных стадиях создания ДВС, что является одним из этапов внедрения CALS-технологий.

Важным аспектом разработки АСИ является создание эффективных средств общения технолога и ЭВМ. Обычно форма внутреннего представления данных в компьютерных системах специфична и с точки зрения пользователя труднопознаваема. Поэтому для работы с такими системами необходимо участие программиста, выступающего в качестве связующего звена между пользователем и компьютерной системой.

Дальнейшим развитием АСИ является отказ от программиста и замена его набором программных средств. Оптимальное решение проблемы эффективного взаимодействия человека и ЭВМ – использование языка их общения, приближенного к естественному.

Порождение технологического языка АСИ (по аналогии с буквенно-символьным) можно осуществить парой:

$$L = \langle A, G \rangle,$$

где  $A$  – алфавит, т.е. конечное множество знаков, из которых строятся элементы языка;

$G$  – грамматические правила, т.е. конечное множество правил построения осмысленных графических структур.

Технологический процесс испытания двигателя представляет собой совокупность операций, из которых выделяют следующие:

- управление частотой вращения вала двигателя;
- управление тормозным устройством;
- управление температурой масла, топлива, охлаждающей жидкости;
- имитация условий эксплуатации двигателя (например, погодных условий).

Операции управления задают режимы испытаний. Процесс управления частотой вращения вала двигателя представляет собой график зависимости частоты вращения  $\omega$  от времени  $t$  (рис. 1), на котором можно выделить характерные участки: разгон (2–3, 4–5), торможение (6–7) и режим постоянного хода (3–4, 5–6). Эти режимы в графическом языке представлены тремя элементарными операциями: увеличение, уменьшение частоты вращения вала двигателя и установление равновесной нагрузки на валу двигателя. Именно эти элементы и составляют алфавит графического языка. Каждая операция управления имеет вектор настройки, описывающий ее параметры:

- время начала и окончания операции;
- начальное и конечное значения технологического параметра;
- тип операции – закон, отражающий характер изменения технологического параметра

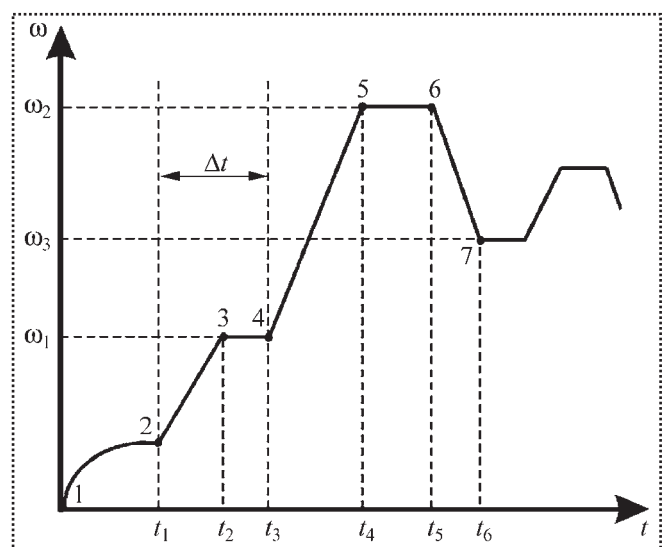


Рис. 1. Программа управления частотой вращения вала



ра (линейный, экспоненциальный, гармонический и т.д.);

– коэффициенты формулы, описывающей данный тип операций.

Таким образом, процесс создания технологии испытания при помощи графического языка сводится к построению из графических образов элементарных операций желаемых графиков зависимости технологических параметров от времени.

Грамматические правила  $G$  графического языка испытаний представляют собой конечное множество правил лингвистического описания технологических операций и технологий испытаний с использованием графических элементов алфавита  $A$ .

Программу управления технологическим параметром – график зависимости его значения от времени аналитически можно описать кусочно-заданной функцией  $f(t)$ . Вследствие этого грамматические правила удобно описывать с математической точки зрения. Правила представляют собой ряд ограничений, накладываемых на вид и расположение графика зависимости значения технологического параметра от времени, которые удобно записать в математической форме.

Список грамматических правил графического языка описания технологий испытаний ДВС выглядит следующим образом:

■ Каждому значению времени  $t$  соответствует единственное значение  $f(t)$ . Из однозначного соответствия каждому аргументу только одного значения функции следует отсутствие на графике "петель" и разветвлений.

■ Отсчет времени ведется от нуля до бесконечности, технологические параметры могут принимать только неотрицательные значения, не большие некоторого максимального допустимого и не меньше некоторого минимального допустимого значений:

$$D(f_i) = [0; +\infty);$$

$$E(f_i) = [Y_{i_{\min}}, Y_{i_{\max}}],$$

где  $f_i$  – функция, описывающая зависимость значения  $i$ -го технологического параметра от времени;

$Y_{i_{\min}}$  и  $Y_{i_{\max}}$  – минимальное и максимальное допустимые значения  $i$ -го технологического параметра.

Таким образом, график  $i$ -го технологического параметра лежит в первой координатной четверти в полосе, ограниченной прямыми  $y = Y_{i_{\min}}$  и  $y = Y_{i_{\max}}$ .

■ Все программы управления должны начинаться в нулевой момент времени и заканчиваться в одно и то же время:

$$t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = t_5 = t_6 = 0;$$

$$d_1 = d_2 = d_3 = d_4 = d_5 = d_6,$$

где  $t_i$  и  $d_i$  – соответственно время начала и длительность программы управления  $i$ -м технологическим параметром.

■ В программах управления не должно быть разрывов:

$$\exists f_i(t) \forall t \in D(f_i).$$

■ Допустимые скорости изменения значений технологических параметров связаны с конструктивными особенностями двигателя и ограничены физическими законами:

$$\frac{df_i(t)}{dt} \geq A_{i_{\text{ум}}} \forall t \in D(f_i);$$

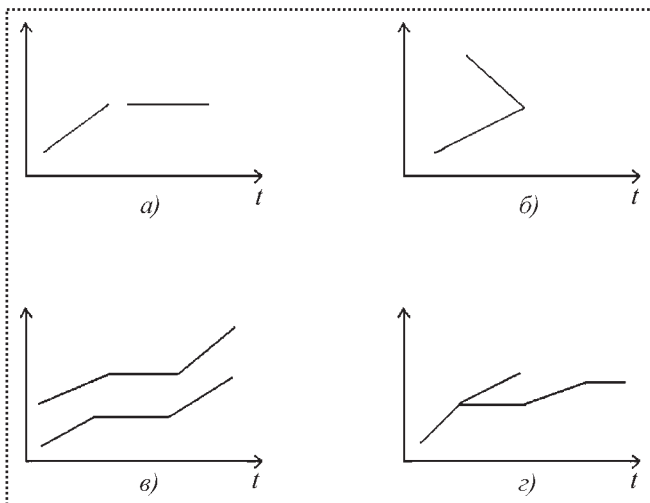
$$\frac{df_i(t)}{dt} \leq A_{i_{\text{уб}}} \forall t \in D(f_i),$$

где  $A_{i_{\text{ум}}}$ ,  $A_{i_{\text{уб}}}$  – максимальная допустимая скорость соответственно уменьшения или увеличения  $i$ -го технологического параметра.

Грамматические правила связаны с корректным формированием графических образов операций управления технологическим процессом, поэтому рассмотрим возможные ошибки:

1. Разрыв управляющего образа технологической операции (рис. 2, а).





**Рис. 2. Возможные ошибки при проектировании технологии испытания:**

- a* – разрыв управляющего образа технологической операции;
  - б* – задание управления с противоположным движением по временной оси;
  - в* – создание двух образов управления одной и той же операцией;
  - г* – разветвление образа операции;
- ось ординат – значение любого технологического параметра

2. Задание управления с противоположным движением по временной оси (рис. 2, б).

3. Создание двух образов управления одной и той же операцией (рис. 2, в).

4. Разветвление образа операции (рис. 2, г).

Ошибка 1 – это разрыв в непрерывном управлении технологическим процессом, который приведет к сбою работы системы в интервале разрыва. Ошибка 2 представляет собой отсутствие физического смысла при работе системы, так как время движется в одну сторону. Ошибки 3 и 4 также приводят к сбою системы из-за неоднозначности управления, т.е. в один и тот же момент времени один и тот же управляемый параметр должен иметь разные значения.

Устранение возможности возникновения этих ошибок позволит сократить время на разработку технологий испытаний и повысить эргономичность АСИ ДВС.

**Применение грамматических правил языка АСИ ДВС.** Отметим, что ошибки 1, 3, 4 возник-

ают при разрыве управляющего образа технологической операции. Устранив принципиальную возможность появления разрыва технологии испытания при проектировании, можно избавиться от таких ошибок.

Один из способов решения этой проблемы – методика, основанная на использовании узловых точек. Ее суть заключается в том, что технолог работает не с самими графическими образами операций управления, а с узловыми точками их сопряжения. Учитывая важность роли, которую они при этом играют, можно назвать их "ключевыми" точками.

Добавление в графический элемент узловой точки фактически означает его разделение на два сопряженных элемента. Удаление точки означает слияние двух соседних элементов в один. Для однозначного определения операции управления достаточно указать "ключевые" точки соответствующего графического элемента, являющиеся его концами. Для удобства векторы настроек операций также привязываются к узловым точкам. Таким образом, процесс задания режимов испытания сводится к манипуляциям с узловыми точками. Очевидно, что разрыва технологии испытания при этом не происходит.

Это означает, что при использовании метода узловых точек ошибки 1, 3 и 4 принципиально невозможны. Ошибка 2 устраняется введением дополнительного правила перемещения узловых точек: абсцисса узловой точки всегда должна быть не меньше абсциссы левой соседней точки и не больше абсциссы правой соседней точки. На рис. 1 представлен допустимый интервал  $\Delta t$  изменения временной координаты узловой точки.

В начале проектирования задают длительность испытания, начальные и конечные значения всех технологических параметров. Для вновь создаваемой технологии испытания формируют по одной операции управления для каждого технологического параметра. Эти операции являются обязательными (обязательными), и удалить их нельзя. Их можно лишь разбить на несколько подопераций, суммар-



ная длительность которых равна длительности исходных облигатных операций. Другими словами, технология испытания всегда содержит не менее двух "ключевых" точек, которые задаются в начале проектирования.

Далее технология испытания настраивается желаемым образом путем добавления и удаления узловых точек и задания параметров векторов настройки.

Эту методику можно использовать в программном комплексе АСИ ДВС, который позволяет проводить весь комплекс работ по проектированию технологий испытаний, осуществлять как испытания непосредственно на стенде, так и их компьютерное моделирование.

С помощью среды автоматизированного проектирования технологий испытаний технолог может спроектировать любую допустимую технологию испытания. Затем на ее основе АСИ рассчитывает управляющий сигнал для исполнительных устройств. После этого можно провести испытание на стенде или смоделировать его на компьютере. С помощью математического моделирования можно проанализировать протекание отдельных рабочих процессов и всего рабочего цикла, прогнозировать основные показатели и характеристики двигателя.

### Выводы

*Использование автоматизированных систем испытаний обеспечивает информационную поддержку ДВС на этапе испытания опытных образцов и является одним из этапов внедрения CALS-технологий.*

*Применение графического языка АСИ ДВС обеспечивает высокую наглядность создаваемых*

*управляющих программ, их корректность и надежность за счет унификации программного описания графических структур.*

*Методика реализации грамматических правил, основанная на использовании узловых точек, позволяет решить ряд проблем, связанных с проектированием технологий испытаний при помощи графического языка. Преимущества методики следующие:*

*– на всех этапах создания технология испытания остается непрерывной, что ведет к уменьшению количества ошибок при проектировании;*

*– упрощается процесс проверки корректности технологии испытания в соответствии с грамматическими правилами графического языка;*

*– значительно сокращаются затраты времени на проектирование технологий испытаний с помощью АСИ ДВС.*

### Библиографический список

1. Судов Е.В. Модели, методы и средства управления и интегрированной информационной поддержки процессов жизненного цикла наукоемкой продукции. Диссертация ... д-ра техн. наук. М.: НИЦ CALS-технологий. "Прикладная логистика", 2005. 298 с.
2. Автоматизированные испытания в авиастроении / Р.И. Адгамов, М.М. Бехреев, И.А. Заляев и др. –М.: Машиностроение, 1989. 232 с.
3. Биктимиров Р.Л., Садыков И.Х., Хайруллин А.Х. Математическое обеспечение автоматизированных систем исследований и испытаний двигателей внутреннего сгорания. –М.: Машиностроение, 1995. 256 с.
4. Основы систем автоматизированного проектирования / М.М. Бехреев, И.А. Заляев, Ю.В. Кожевников и др. Под. ред. Ю.В. Кожевникова. –Казань: Изд-во КГУ, 1988. 253 с.
5. Игнатьева Т.И., Колесник Б.А., Миронов Н.П. Информационно-измерительная управляющая система автоматизации испытаний двигателей // Двигателестроение. 1989, № 2. С. 31.



УДК.621.562.62

**А.В. Гориш, В.П. Дунаевский, д-ра техн. наук, А.Б. Кириллов, А.Н. Котов, Ю.Н. Макаров, канд-ты техн. наук (ФГУП НПО "Техномаш", Москва)**  
 E-mail: info@tmnpo.ru (Котов)

## **Анализ механизма управления интегрированным производственно-технологическим комплексом при конструировании и производстве систем информационно-измерительной техники**

*Изложен алгоритм реализации функционально-целевого подхода к анализу механизма управления при совершенствовании и развитии интегрированного производственно-технологического комплекса. Представлена схема выработки управляющих воздействий, в которой роль человека при анализе данных прошлого опыта, формировании целевой функции и ввода данных о состоянии объекта выполняет экспертная система, формирующая событийную модель структуры и функционирования технологических процессов.*

*Set forth algorithm implementation functional-target approach for analysis control mechanism at improvement and development integrated production-engineering assembly. Present itself scheme generation managerial class influence, in which people part in analysis facts past experience, formation target function and introduction information about status object, carry out wizard system, take shape event-trigger model of structure and so functioning work process.*

**Ключевые слова:** целевая функция, функционально-целевой подход, информационно-измерительная техника, производственно-технологический комплекс, механизм управления.

**Key words:** target function, functional-target approach, informative-measuring technique, production-engineering assembly, control mechanism.

Представим анализ механизма управления в совершенствовании и развитии интегрированного производственно-технологического комплекса (ИПТК). Определим цели управления, взаимные связи, методы реализации оптимальных путей, качество управления [1–4]. Представим и докажем подобие системы управления

(СУ) в технических системах производства информационно-измерительной техники, экономике, окружающих объектах и живой природе. Обоснуем необходимость применения и реализации функционально-целевого подхода к анализу СУ ИПТК. Проанализируем обобщенную модель управления на основе ситуационного подхода.

В модель протекающих событий технологического процесса, исходя из сформулированных интуитивных представлений о процессах, введем систему понятий, позволяющую структурировать поведение и функциональную деятельность технологического объекта управления как последовательность выполняемых методических процедур и действий с реализацией в этих процедурах ресурсов и полученных результатов, жесткой увязкой и согласованием с этими процедурами значений соответствующих параметров изделий продукции, ресурсов, временных параметров, циклов производственных, экономических затрат, инженерно-технологического обслуживания и т.д.

Рассмотрим несколько вариантов событийных моделей (модели агрегата, технологического процесса, структуры производства, математического аппарата управления производством), достаточных для имитации рассматриваемой или исследуемой схемы поведения структуры потоковой технологии (технологической сети). В этих моделях, процедурах, жизненных циклах, атрибутах достаточно информации для контроля и управления технологическим объектом.



Известно, что любой технологический процесс представляет набор компонентов:

$$TP_j = \langle A_j, R_j, MS_j, M\Phi_j \rangle, \quad (1)$$

где  $A_j \in A$  – подмножество агрегатов, обеспечивающих выполнение заданного процесса  $TP_j$ ;

$R_j \in R$  – подмножество продуктопроводов, участвующих в его выполнении.

Представим мощность технологической сети

$$|A_j| = |I_{A_j}| = m, \quad (2)$$

пронумеруем агрегаты (механизмы) из  $A_j$  в порядке их запуска (настройки) на работу (функционирование) в процессе  $TP_j$  и расположим их в соответствии с номерами в кортеж

$$KA_j = \langle \alpha_{j1}, \dots, \alpha_{jm} \rangle, \quad (3)$$

определяющий как состав средств, так и порядок запуска агрегатов, механизмов и устройств, входящих в процесс

$$\alpha_{jk} \triangleright TP_j. \quad (4)$$

Матрица настроек (установок)  $MS_j$  определяется (устанавливается) при формировании процесса  $TP_j$  на этапе определения функционирования технологического процесса. В  $MS_j (n, m+1)$  каждый  $i$ -й столбец ( $i = 1-m$ ) содержит настройки агрегата  $\alpha_{ji} \triangleright TP_j$ , расположенного в  $i$ -й позиции кортежа  $KA_j$ . При этом  $MS_j (1, -)$  – первая строка – определяет настройку старта (начало функционирования) процесса;  $MS_j (2, -)$  – вторая строка – завершение настройки, а остальные – настройки реконфигурации. Не исключено, что в технологическом процессе могут иметь место варианты коррекции структуры потока без прерывания функционирования процесса изготовления продукции.

Матрица функций реализуемости  $M\Phi_j (n, m)$  определяется по матрице настроек (установок) следующим образом: пусть

$$MS_j(k, i) = y_s \in Y_{ji}, \quad (5)$$

это означает, что агрегат (механизм, аппарат)  $\alpha_{ji}$  при  $k$ -й настройке должен быть переведен в состояние (положение)  $y_s \in Y_{ji}$ , тогда  $M\Phi_j(k, i) = \Phi_{ki}$  – булева функция, описывающая логические условия, при которых допустимо использование агрегата (механизма, аппарата)  $\alpha_{ji}$  в  $k$ -й настройке процесса  $TP_j$ . Первую строку  $M\Phi_j (1, -)$  обозначим через кортеж реализуемости

$$K\Phi_j = \langle \Phi_{j1}, \Phi_{j2}, \dots, \Phi_{jm} \rangle.$$

Этот кортеж является одной из характеристик процесса  $TP_j$ , по нему вычисляют функцию реализуемости процесса, а точнее, готовности к функционированию технологического процесса.

В общем случае информативность ИПТК

$$I = I(S_1, S_2, \dots, S_n), \quad (6)$$

где  $S_i$  – параметры ИПТК, влияющие на данный вид обработки (корректировки) входной информации.

Естественно, что параметры реальной системы отклоняются от своих номинальных значений в силу различных причин (сбои, ошибки операторов, падение напряжения и т.д.), что приводит к искажениям входной информации. Введение контроля в процессе ее получения позволяет свести искажения информации к допустимой величине. Таким образом, выбранный процесс содержит в себе элементы, непосредственно участвующие в процессе ввода информации, и элементы, выполняющие вспомогательные функции, предназначенные для измерения, контроля и управления ИПТК.

Возьмем простой пример – деталь, подлежащая обработке. Мы рассматриваем процесс получения входной конструкторской информации о детали и регистрации в базе данных ИПТК, при этом основными функциями будут выбор и подключение к системе нужного канала источника информации, внедрение данных в буфер устройства ввода, запись информации на твердом носителе.



С учетом внесенных данных и их ввода определяем робастную устойчивость системы управления и проводим ее анализ на основе характеристического полинома. Определяем главные задачи технологии управления сложной системой. Таким образом, СУ ИПТК можно рассматривать как гибкую дискретную систему, описываемую при моделировании дискретными множествами моментов времени и различными значениями параметров. Схему моделирования выбирают на основе анализа и использования экспертных значений целевой функции, структуры объекта управления и статистических данных, полученных от управления системой на предыдущих этапах работ.

На основе данных о различных ситуациях предлагаем иерархическую модель ИПТК, содержащую концептуальную модель предметной области и экспертную систему со множеством базовых элементов, набором синтаксических правил порождения одних элементов модели другими.

Наиболее важный фактор – использование экспертных систем для автоматизированного выбора управляющих воздействий. На рисунке

представлена схема выработки управляющих воздействий, в которой роль человека при анализе данных прошлого опыта, формировании целевой функции и оценке состояния объекта выполняет экспертная система. Она содержит и обновляет знания об объекте, формирует знания на основе прошлого опыта и приобретенных навыков управления, цели функционирования, статистическую информацию об объекте. Параллельно с этим геоинформационные системы формируют и поставляют информационные данные о географическом расположении объектов, их взаимосвязи и влиянии на технологический процесс. Экспертная система обеспечивает более широкий круг знаний и решение задач, так как ее обслуживает большое число экспертов и в ней содержится громадный опыт в виде информации специалистов и экспертов.

Для реализации управления необходимо разработать и внедрить пакеты прикладных программ математического моделирования сложнейших процессов, автоматизированного проектирования конструктивных элементов, конструкций и различных исполнительных

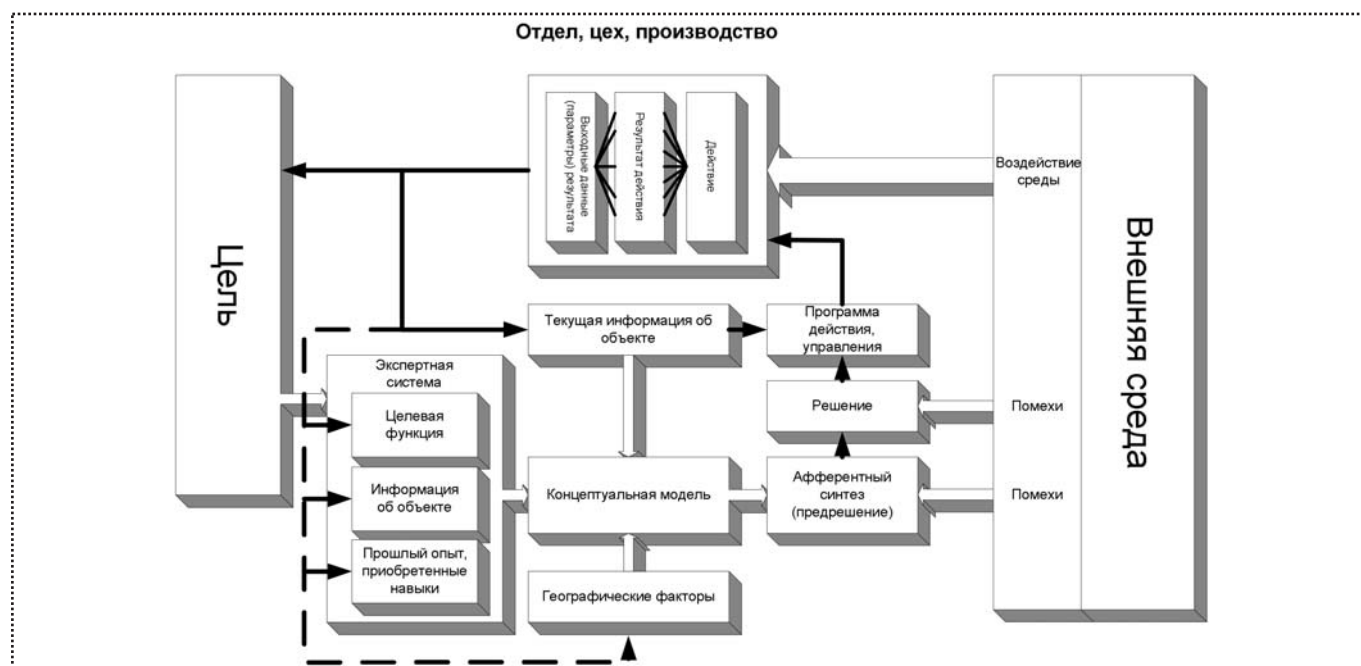


Схема выработки управляющих воздействий



приборов, подверженных разнообразным воздействиям внешней среды.

Для количественной характеристики алгоритмов управления необходимо вводить параметры, характеризующие качество этих алгоритмов. Следует определить принципы и способы построения параметров алгоритмов для любого уровня организации системы по известным параметрам атомарных алгоритмов.

При задании критерия качества требуется выбор алгоритма из одного класса эквивалентности на основе анализа показателей качества. Функция определения качества управления имеет вид:

$$W = F(K, K_{\text{зад}}), \quad (7)$$

где  $K_{\text{зад}}$  – множество параметров целеполагания, задаваемое вышестоящим органом управления;

$K$  – множество тех же параметров, фактически вырабатываемых экспертной системой.

Необходимо вводить информационный критерий качества алгоритма проектирования. После этого разрабатывают событийную модель структуры и функционирования технологических процессов. Она необходима для моделирования процессов, ремонта и обслуживания оборудования и учета (косвенного) функционирования неавтоматизированного оборудования. Все это обеспечивает использование событийного моделирования и делает АСУ ТП прозрачной для смежных систем управления производством. Затем определяют схему взаимодействия компонентов событийной модели, а также формирования команд управления на основе вычисления отклонения текущего состояния сети от требуемого процессом.

Характеристический полином системы имеет вид:

$$G(S) = kP(S) + Q(S) \prod_{i=1}^m (1 + T_i(S)), \quad (8)$$

где  $k \geq 0$  – коэффициент передачи;

$P(S)$ ,  $Q(S)$  – известные полиномы, описывающие регулятор;

$T_1, \dots, T_m$  – постоянные времена, принадлежащие заданным отрезкам

$$\alpha_i \leq T_i \leq b_i, \quad (i=1, \dots, m), \quad (9)$$

здесь  $\alpha_i, b_i$  – константы, определяющие вариации  $T_i$ .

Коэффициент  $k$  либо задан точно, либо имеет нечеткое описание, т.е. принадлежит отрезку  $[0, k]$ , где  $k \geq 0$ . Все полиномы (8), удовлетворяющие условиям (9), будем считать доступными.

Достаточное условие робастной устойчивости системы, описываемой семейством полиномов, полилинейно зависящих от параметров, для задач анализа системы управления формулируется следующим образом. Условно возьмем какую-либо вершину  $V$  многомерного параллелепипеда

$$T_i = \alpha_i, \quad i \in A, \quad T_k = b_k, \quad k \in B, \quad W = A \cup B,$$

где  $A, B$  – непересекающиеся множества.

Зная, что  $S = j\omega$ , вычислим  $G(j\omega, V)$  – значение  $G(j\omega)$  для такого набора  $T_i$  и возьмем для каждого  $\omega$

$$G(\omega) = \text{co}\{G(j\omega, V), V \in U\}, \quad (10)$$

где  $V$  – множество всех вершин параллелепипеда;

$\text{co}$  означает выпуклую оболочку.

Теорема Заде и Дезоера утверждает, что если какой-либо допустимый полином гурвицев и  $0 \in G(\omega)$  для всех  $0 \leq \omega \leq \infty$ , то семейства (8), (9) робастно устойчивы. Однако число вершин  $V = 2^m$ , поэтому такой способ весьма трудоемок для больших  $m$ .

В этой связи рассматривают возможности и свойства элементарных многоэкстремальных функций. Исходным классом для их конструирования выберем класс функций  $\Psi$  – положительных, бесконечно дифференцируемых, четных, имеющих максимум лишь в нуле (равный единице), лишь два нуля второй производной и интегрируемых с квадратом на всей вещественной оси.



На основе функций  $\psi \in \Psi$  можно получить два вида наиболее простых многоэкстремальных функций:

$$C[\psi; x] = c \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n \psi[\beta(x - n\pi)]; \quad (11)$$

$$C[\psi; x] = c \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n \psi \left[ \beta \left( x - \frac{\pi}{2} - n\pi \right) \right], \quad (12)$$

где константу  $c$  найдем из выражения

$$c = C^{-1}[\psi; 0] = \left[ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^n \psi(\beta n\pi) \right]^{-1}. \quad (13)$$

Проведя анализ основных свойств этих функций, определим возможность их применения в задачах синтеза робастных систем.

### Выводы

*При конструировании и производстве систем информационно-измерительной техники для технологического обеспечения сборочного и других видов производств целесообразно использовать событийную модель структуры и функцио-*

*нирования технологических процессов, содержащую концептуальную модель предметной области и экспертную систему с множеством базовых элементов, набором синтаксических правил порождения одних элементов концептуальной модели предметной области другими.*

*Такой подход позволяет повысить эффективность систем автоматического управления производственно-технологическими комплексами контрольно-измерительного оборудования, обеспечивающего функционирование сборочных производств различных отраслей промышленности.*

### Библиографический список

1. **Пьезоэлектрические** преобразователи для вибрационного контроля и диагностирования / А.В. Гориш и др. // Зарубежная радиоэлектроника. — 1996. № 8. Вып. 1.
2. **Дунаевский В.П.** Аппаратура для виброизмерений в РКТ. — Королев: РКК "Энергия", 2003.
3. **Котов А.Н.** Требования к элементной базе ИИВО канала бортового базирования // Информационно-измерительная техника, экология, мониторинг. — М.: МГУЛ, 2003. Вып. 6.
4. **Юрков Н.К.** Информационная модель принятия решений управления сложными системами // Труды Международного симпозиума "Надежность и качество — 2000". — Пенза: ПГУ, 2000.



## КРАТКИЙ СПРАВОЧНИК МЕТАЛЛИСТА

Под общ. ред. А.Е. Древаля, Е.А. Скороходова

960 с. ISBN: 5-217-03261-8

Цена 1650 р.

В справочнике использовано более 700 ГОСТов, действующих и утвержденных на 1 июля 2004 г.

Приведены сведения по расчету технологических размеров заготовок, основам взаимозаменяемости, методам и средствам контроля, материалам, металлорежущим станкам, токарной обработке, обработке отверстий осевым инструментом и другим видам обработки металлов резанием, электрофизическим и электрохимическим методам обработки, слесарным работам и сборке. Также изложены сведения по технологичности деталей, обеспечению качества и размерной стабильности заготовок, выбору режимов резания, повышению износостойкости резцов и обработке на станках с ЧПУ.

Четвертое издание (3-е изд. 1986 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами и технической документацией, дополнено сведениями по восстановлению режущих свойств инструментов, смазывающе-охлаждающим технологическим средствам и другими материалами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей промышленности, полезен преподавателям и студентам вузов.

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



**Министерство образования и науки Украины  
Севастопольский национальный технический университет  
Технический университет г. Люблин  
Силезский технический университет г. Гливице  
приглашают**

**Вас принять участие в Международной научно-технической конференции  
"АВТОМАТИЗАЦИЯ: проблемы, идеи, решения (АПИР) 2010",  
которая состоится в Севастопольском  
национальном техническом университете  
с 6 по 10 сентября 2010 г.**

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦИИ:**

- автоматизация производства, проектирование автоматизированного оборудования, современные технологии обучения специалистов в области автоматизации в высшей школе;
- моделирование автоматизированных производственных систем;
- автоматизированный контроль, диагностика и информационные системы в машино- и приборостроении;
- управление и компьютерное обеспечение современного производства.

**АДРЕС ОРГКОМИТЕТА:**

99053, Севастополь, ул. Университетская, 33, СевНТУ.

Тел. 0 (692) 43-52-10; 54-53-74.

E-mail: адрес 1 [pc@sevntu.com.ua](mailto:pc@sevntu.com.ua);

адрес 2 (обязательный дубль) [apirsev@rambler.ru](mailto:apirsev@rambler.ru)

в строке "тема" указать: на конференцию "АПИР2010".

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

Адрес электронной почты издательства: E-mail: [mashpub@mashin.ru](mailto:mashpub@mashin.ru);

редакции журнала: [sborka@mashin.ru](mailto:sborka@mashin.ru); [tmm@mashin.ru](mailto:tmm@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., Сониюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 11.02.10 г. Подписано в печать 07.04.10 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 5,30. Заказ 286. 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.