

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ  
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.01 — Теоретическая механика, 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела, 01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, 05.02.02 — Машиноведение системы приводов и детали машин, 05.02.04 — Трение и износ в машинах, 05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы, 05.02.07 — Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении, 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы, 05.02.18 — Теория механизмов и машин, 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности

2021 Том 22  
3 (248)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### *Сборочное оборудование и его элементы*

Азарян Д.К., Чалышев М.С., Шандыбина И.М., Полянчикова М.Ю.  
Разработка и апробация методики оценки позиционной точности механизмов с одной и двумя степенями свободы с использованием компьютерного зрения . . . . . 99  
Иванов А.А., Кретинин О.В. Интеллектуальные сборочные системы . . . . . 102

#### *Современные технологии сборки*

Железникова О.Е., Амеликина С.А., Микаева С.А., Микаева А.С., Дюкин А.А.  
Сборка кварцевидного стола и газовой горелки . . . . . 106

#### *Обеспечение качества. Испытания. Контроль*

Головкин П.А., Логачёв А.В. Эффективность горячего газостатирования прутков из сплава НВ5-ВП для изготовления деталей СВЧ-устройств . . . . . 111  
Иванов В.Е., Пучков П.В. Использование современных методов исследования при разработке новых конструкций зажимов для восстановления работоспособности напорных пожарных рукавов и оценка их технического состояния на основе компьютерного моделирования . . . . . 113

#### *Трение и смазка в машинах и механизмах*

Колмаков К.М., Зверовщиков А.Е., Схиртладзе А.Г., Соколов А.В.  
Определение параметров гетерогенной среды мишени при центробежно-дуговом диспергировании твердых сплавов . . . . . 118  
Поляков С.А., Куксенова Л.И., Кулешова Е.М. Оценка показателей динамичности и вероятности заедания тяжело нагруженных сопряжений скольжения с различными смазочными материалами . . . . . 122  
Попов И.П. Символическое представление вынужденных колебаний разветвленных механических систем . . . . . 127

#### *В помощь конструктору, технологу*

Житников Ю.З., Лошкарёв А.А. Обоснование скорости ударного взаимодействия кулачков гайковерта для упрочнения их поверхностей на заданную глубину . . . . . 133  
Новиков В.В., Осипов К.Н., Маврин С.А. Моделирование сложных технических объектов морской номенклатуры . . . . . 136

#### *Нормативная документация*

Термины и определения по ГОСТ Р 58399—2019. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Общие требования . . . . . 141

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — 84967) или непосредственно в издательстве  
Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96  
E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru  
Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета  
В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

#### Редакционный совет

**МОСКВА**  
А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф. Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.  
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.  
В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н. А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.  
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф. И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.  
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф. Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.  
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н. А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.  
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.

#### Региональные редсоветы

**ВЛАДИВОСТОК**  
Ю.Н. КУЛЬЧИН, акад. РАН  
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

**ВОЛГОГРАД**  
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.  
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН

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

**КАЗАНЬ**  
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

**КОВРОВ**  
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

**КОМСОМОЛЬСКО-НА-АМУРЕ**  
Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.  
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

**НИЖНИЙ НОВГОРОД**  
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

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

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

**ПЕРМЬ**  
С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.  
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

**РОСТОВ-НА-ДОНУ**  
А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.  
И.В. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.  
А.П. СЫЧЕВ

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

**САМАРА**  
Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.  
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., проф.

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**  
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

**ТОМСК**  
А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.  
В.Е. ПАНИН, акад. РАН

**ТУЛА**  
А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.  
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

**ХАБАРОВСК**  
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

**Беларусь**  
**МИНСК**  
В.Л. БАСИНОК, д.т.н.  
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

**ГОМЕЛЬ**  
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

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

**ДОНЕЦК**  
А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

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

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРЕ.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

THE MONTHLY  
JOURNAL  
FOR SCIENTISTS  
AND MANUFACTURERS

# ASSEMBLING



## IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.01 — Theoretical mechanics, 01.02.04 — Mechanics of a deformable solid, 01.02.06 — Dynamics, durability of machines, devices and apparatus, 05.02.02 — Machine science of drive systems and machine parts, 05.02.04 — Friction and wear in machines, 05.02.05 — Robots, mechatronics and robotic systems, 05.02.07 — Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing, 05.02.10 — Welding, related processes and technologies, 05.02.11 — Control methods and diagnostics in mechanical engineering, 05.02.13 — Machines, units and processes, 05.02.18 — Theory of mechanisms and machines, 05.04.11 — Nuclear reactor construction of machine, units and technology of the nuclear industry materials

2021 Vol. 22  
**3 (248)**

### CONTENTS

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

- Azaryan D.K., Chalyshev M.S., Shandybina I.M., Polyanchikova M.Yu.** Development and approbation of a technique for assessing the positional accuracy of mechanisms with one and two degrees of freedom using computer vision ..... 99
- Ivanov A.A., Kretinin O.V.** Intelligent assembly systems ..... 102

#### *Modern technologies in assembly*

- Zeleznikova O.E., Amel'kina S.A., Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Diukin A.A.** Assembly of quartz blowing table and gas burner ..... 106

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

- Golovkin P.A., Logachev A.V.** Efficiency of hot gasostating of bars made from NV5-VP alloy for manufacturing of details for microwave devices ..... 111
- Ivanov V.E., Puchkov P.V.** Use of modern research methods in the development of new clamp designs for restoring the operability of pressure fire hoses and assessment of their technical condition based on computer modeling ..... 113

#### *Friction & lubrication in machines and mechanisms*

- Kolmakov K.M., Zverovshchikov A.E., Skhirtladze A.G., Sokolov A.V.** Determination of the parameters of the target heterogeneous medium during centrifugal-arc dispersion of hard alloys ..... 118
- Polyakov S.A., Kuksenova L.I., Kuleshova E.M.** Evaluation of the dynamics and probability of jamming of heavy-loaded sliding pairings with different lubricants ..... 122
- Popov I.P.** Symbolic representation of forced vibrations of branched mechanical systems ..... 127

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

- Zhitnikov Yu.Z., Loshkarev A.A.** Justification of the rate of impact interaction of the nutrunner cams to strengthen their surfaces to the given depth ..... 133
- Novikov V.V., Osipov K.N., Mavrin S.A.** Modeling the complex technical objects of the marine nomenclature ..... 136

#### *Command papers*

- Terms and definitions according to GOST R 58399—2019. Non-destructive testing. Optical methods. General requirements ..... 141

**Chair of Editorial Advisory Board —  
Member of Russian Academy of Science**  
V.I. KOLESNIKOV

#### Editors

##### MOSCOW

A.S. VASIL'EV  
(Chief editor)  
V.V. BARDUSHKIN  
I.A. BUYANOVSKY  
M.V. VARTANOV  
S.M. ZAKHAROV  
I.N. ZININA

Yu.L. IVANOV  
A.V. IGNATOV  
A.I. KUMENKO  
I.A. LUBININ  
B.V. SHANDROV  
A.G. KHOLODKOVA

#### Regional editors

##### VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN  
A.A. SUPONIA

##### VOLGOGRAD

M.G. KRISTAL  
V.I. LYSAK

##### IZHEVSK

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

##### KAZAN

R.I. ADGAMOV

##### KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

##### KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN  
A.M. SHPILEV

##### NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

##### OREL

Yu.S. STEPANOV  
G.A. KHARLAMOV

##### ORENBURG

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

##### PERM

S.M. BELOBORODOV  
V.F. MAKAROV

##### ROSTOV-ON-DON

A.A. RYZHKIN  
I.V. KOLESNIKOV  
A.P. SYCHEV

##### RYBINSK

V.F. BEZIAZYCHNYI  
V.V. NEPOMILUEV  
A.N. SEMENOV

##### SAMARA

Yu.A. VASHUKOV  
M.A. EVDOKIMOV

##### ST.-PETERSBURG

E.V. SHALOBAEV

##### TOMSK

A.V. KOLUBAEV  
V.E. PANIN

##### TULA

A.A. MALIKOV  
V.V. PREYS

##### KHABAROVSK

V.I. SCHPORT

##### Belarus

##### MINSK

V.L. BASINJUK  
M.L. KHEIFETZ

##### GOMEL

V.E. STARZHINSKI

##### Ukraine

##### KIEV

A.S. ZENKIN  
V.A. MATVIENKO

##### DONETSK

A.N. MIKHAILOV

##### Poland

P. LEBKOVSKI  
E. LUNARSKII

#### Executive editors of current issue:

E.M. NUZHINA, I.M. GLIKMAN

Journal is distributed on subscription, which can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — 84967) or directly in editorial of the journal.

Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

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

The reference to the *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal* during reprint of the materials is mandatory.

Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.  
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

Д.К. Азарян, М.С. Чалышев, И.М. Шандыбина, канд. техн. наук,  
М.Ю. Полянчикова, канд. техн. наук  
(Волгоградский государственный технический университет)  
E-mail: mupolyan4ikova@yandex.ru

## Разработка и апробация методики оценки позиционной точности механизмов с одной и двумя степенями свободы с использованием компьютерного зрения

*Рассмотрены существующие методики определения позиционной точности механизмов. Предложена методика определения позиционной точности механизмов с одной и двумя степенями свободы с использованием компьютерного зрения.*

*The existing methods for determining the positional accuracy of manipulators are considered. A technique for determining the positional accuracy of mechanisms with one and two degrees of freedom using computer vision is proposed.*

**Ключевые слова:** позиционная точность, повторяемость, методика, манипулятор, компьютерное зрение, камера.

**Keywords:** positional accuracy, repeatability, technique, manipulator, computer vision, camera.

В настоящее время существуют различные методы и методики оценки позиционной точности, начиная с использования пишущего инструмента и листа бумаги и заканчивая использованием высокоточных приборов [1, 2]. Практика показывает, что обеспечение высокого уровня оценки позиционной точности механизмов неизменно связано со значительными затратами на оборудование. В этой связи актуальной проблемой робототехники является создание нового или усовершенствование старого метода, позволяющего обеспечить высокий уровень оценки позиционной точности промышленного робота при одновременном сокращении затрат на его реализацию.

Одно из самых перспективных направлений в измерениях — использование компьютерного зрения и базирующихся на нем методик [3, 4].

В ВолгГТУ создана методика оценки позиционной точности механизмов с одной и двумя степенями свободы на базе разработанного метода, основанного на использовании компьютерного зрения [5]. В предложенном методе

в качестве средства измерения выступают две аналоговые камеры, работающие в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях. Одна из камер находится над рабочей областью робота и измеряет перемещения в горизонтальной плоскости, а другая расположена сбоку, но обращена в сторону рабочей области робота так, чтобы она могла измерить перемещение робота по вертикали.

На захват робота крепят две метки (черный квадрат на белом фоне) с известными размерами и точностью, определяемой разрешающей способностью принтера. Одну метку крепят поверх захвата, а вторую — сбоку, так чтобы попасть в поле зрения камеры. Робот совершает движение по строго заданному алгоритму, приведенному в ГОСТ 60.3.3.1—2016. В процессе выполнения теста камеры фиксируют координаты перемещения центра метки. Полученные данные передаются беспроводным способом на компьютер, на котором средствами разработанного программного обеспечения выполняется расчет суммарных показателей точности позиционирования. Этот расчет сопровождается

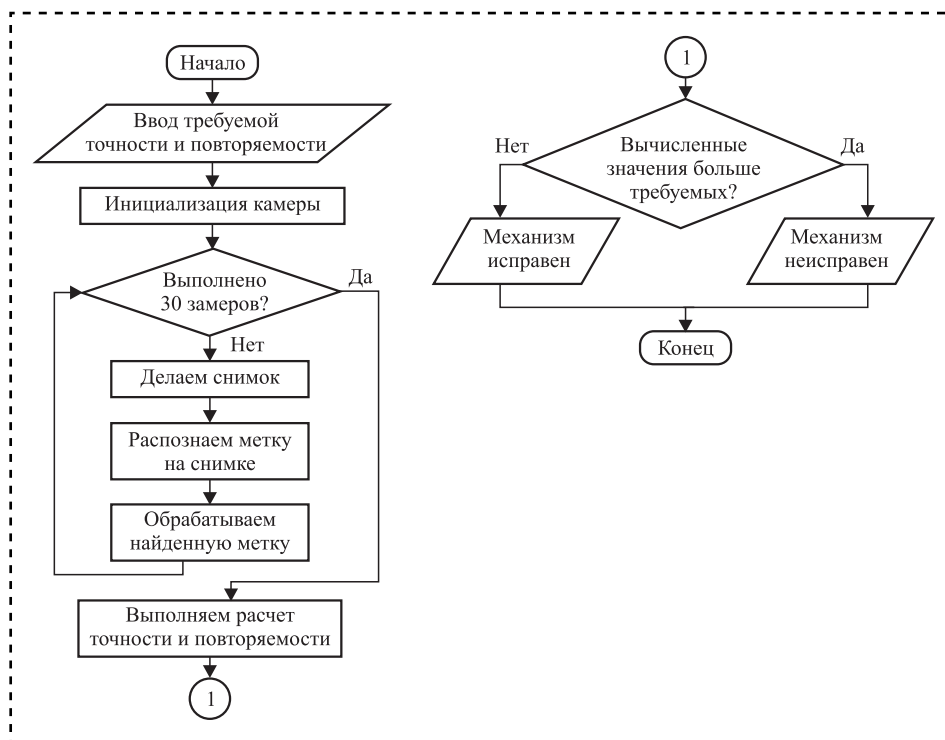


Рис. 1. Блок-схема оценки позиционной точности и повторяемости

выводом отчетов с результатами, полученными в ходе анализа данных.

Блок-схема процесса оценки позиционной точности и повторяемости с помощью компьютерного зрения представлена на рис. 1.

Процесс оценки позиционной точности и повторяемости с помощью компьютерного зрения начинается с задания позиционной точности и повторяемости, которой должен обладать промышленный робот. Как правило, точность и повторяемость одинаковы для каждой степени свободы устройства, но в общем случае эти параметры для каждой степени свободы индивидуальны, и требования к ним установлены в нормативно-технической документации на механизм.

После инициализации камер выполняют необходимое число замеров, рассчитывают значения позиционной точности и повторяемости и полученные результаты сравнивают с заданными значениями. На основании сравнительного анализа делают вывод о работоспособности механизма.

Для апробации предложенного метода использована экспериментальная установка (рис. 2 на стр. 2 обложки).

Измерительная часть установки состоит из одноплатного компьютера Raspberry Pi

model B 1, камеры Raspberry Pi Camera v 1.3 2, подключенной посредством интерфейса CSI, модема 3 для беспроводного подключения к ноутбуку, SD-карты 4, где находится операционная система, и сигнализирующего светодиода 5, который загорается в тот момент, когда камера делает снимок.

Для апробации предложенной методики и тестирования разработанного программного обеспечения провели серию экспериментов для механизмов с одной и двумя степенями свободы, работающих в одной плоскости. В этом случае для оценки позиционной точности необходимо и достаточно использовать только одну камеру.

Первый эксперимент для оценки позиционной точности учебного модульного робота являлся подготовительным. В нем в качестве механизма с одной поступательной степенью свободы выступали тиски (ход 5 мм). Над тисками размещена камера с одноплатным компьютером Raspberry Pi (рис. 3, а на стр. 2 обложки).

Установка состоит из средства измерения 1, расположенного на креплении 4, метки 2, расположенной на подвижной губке тисков 3 таким образом, чтобы попасть в поле зрения камеры.

Во втором эксперименте в качестве механизма с двумя поступательными степенями свободы, для которого необходимо было оценить



позиционную точность, выступали продольные и поперечные салазки токарно-винторезного станка 16К20 (с ходом 40 мм и 4 мм). Над тисками размещена камера с одноплатным компьютером Raspberry Pi (рис. 3, б, в).

Установка состоит из средства измерения 1, установленного на креплении 4, метки 2, установленной на салазках станка 3. Метка установлена так, чтобы попасть в поле зрения камеры.

Результаты поведенных экспериментов приведены в таблице на стр. 3 обложки.

На эскизах в таблице изображен последний сделанный кадр. Черный квадрат — метка. Зеленый контур означает, что камера распознала квадрат на снимке. Желтая точка — первый кадр, т.е. точка отсчета. Белые точки — промежуточные кадры. Красная точка — среднее значение координаты белых точек.

Таким образом, проведенная серия экспериментов по определению позиционной точности и повторяемости на механизмах, работающих в одной плоскости с использованием одной камеры, подтвердила работоспособность предлагаемой методики и разработанного программного обеспечения [5].

Данная методика позволяет проводить работы по периодическому обслуживанию механизмов с одной или двумя поступательными степенями подвижности и оценивать техно-

логические возможности оборудования за достаточно короткое время, а также формировать историю состояния механизма и прогнозировать развитие дефектов устройства. Изменения рабочих характеристик механизма с течением времени могут отображаться в виде графиков зависимости от времени.

### Библиографический список

1. Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Павлюк Е.Ю. Определение точности позиционирования роботоманипуляторов DELTA и OMEGA // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. Т. 2. 2016. С. 121–126.
2. Система QC-20W ballbar [Электронный ресурс]: сайт компании Renishaw. Режим доступа: <http://www.renishaw.ru/ru/qc20-w-ballbar-system-11075> (дата обращения: 28.11.2017).
3. Пешкова А.М., Куц М.С., Петрухин В.Ю. Использование компьютерного зрения при базировании заготовок на станках с ЧПУ // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. № 2 (1). С. 33–36.
4. András Rövid. Machine vision-based measurement system for vehicle body inspection // Acta Polytechnica Hungarica. 2013. Vol. 10. No 5. P. 145–158.
5. Азарян Д.К., Чалышев М.С., Шандыбина И.М., Полянчикова М.Ю. Методика определения позиционной точности учебного модульного робота // Актуальные вопросы профессионального образования (АВПО). 2017. № 4 (9). С. 9–11.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"  
продолжает подписку на журнал

### "СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Тел.: 8 (495) 785-60-69

e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru), [www.mashin.ru](http://www.mashin.ru)





**А.А. Иванов, О.В. Кретинин**, д-ра техн. наук  
(Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева)  
E-mail: kretinin@list.ru

## Интеллектуальные сборочные системы

*В рамках искусственного интеллекта показано, что интеллектуальная сборочная система должна вырабатывать решения, обеспечивающие выполнение поставленной цели с учетом конкретной ситуации, в том числе в условиях неопределенности.*

*In the framework of artificial intelligence, it is shown that an intelligent assembly system must develop solutions that ensure the implementation of the goal, taking into account a specific situation, including in conditions of uncertainty.*

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, интеллектуальная сборочная система, базовый мехатронный модуль, нечеткая логика.

**Keyword:** artificial intelligence, intelligent assembly system, basic mechatronic module, fuzzy logic.

В рамках искусственного интеллекта (ИИ) решаются задачи аппаратного или программного моделирования тех видов человеческой деятельности, которые традиционно считаются интеллектуальными. В отличие от систем с программным управлением, интеллектуальная система должна уметь выполнять творческие функции, т.е. вырабатывать решения, обеспечивающие выполнение поставленной цели с учетом конкретной ситуации, включая выработку решений в условиях неопределенности. Интеллектуальные системы необходимы в сборочных технологиях при манипулировании объектами в пространстве, для выполнения навигации с задачами локализации (определение местонахождения) и планирования движения (как добраться до цели).

Приоритетные направления развития интеллектуальных сборочных систем:

1. Разработка систем манипулирования объектами с развитым сенсорным аппаратом, обеспечивающим работу по принципу ситуация — действие в целях выбора оптимального алгоритма действия в зависимости от реального состояния физического процесса.

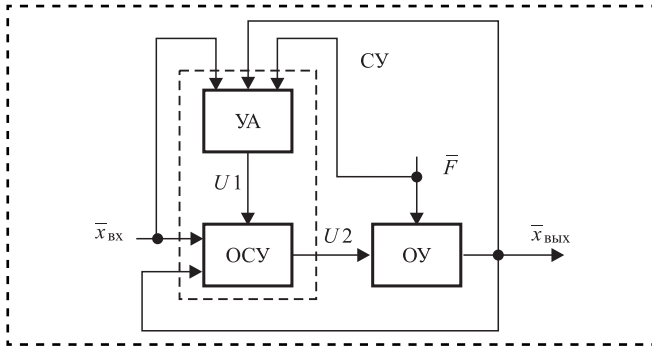
2. Создание нового поколения средств адаптации в целях наделения сборочных систем способностью к самообучению и распознаванию образов, являющейся одним из важнейших элементов искусственного интеллекта.

3. Переход в системах управления сборочными комплексами на быстродействующие ЭВМ с интеллектуальным интерфейсом, позволяющим пользователю работать с управляющей ЭВМ средствами естественного языка.

С развитием ИИ автоматические сборочные системы приобретают способность к моделированию внешней среды, анализу производственной обстановки, принятию решений и планированию собственных действий. К одному из начальных этапов ИИ можно отнести применение адаптивного управления, которое позволяет проводить автоматическое изменение режима сборочного процесса независимо от программы (рис. 1).

В наиболее совершенных системах управления (СУ) (с элементами ИИ) обеспечивается автономное функционирование управляемого объекта в соответствии с поставленной в общей форме целью, т.е. в условиях неопределенности и изменчивости внешней среды.

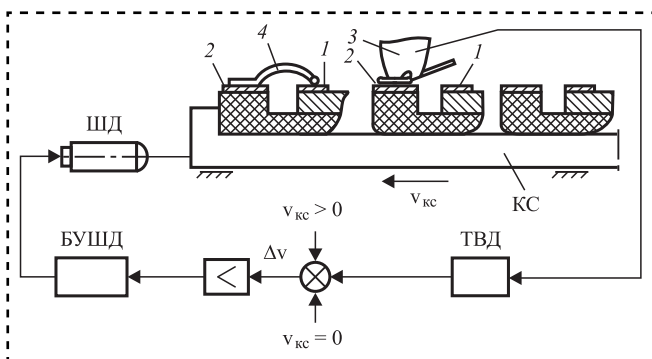
Адаптивные (самоприспосабливающиеся) системы управления (АдСУ) используют в вычислительно-управляющих комплексах с измерением определенных выходных параметров и выработкой управляющих воздействий по результатам измерений (например, управление скоростью перемещения рабочего органа). Примером изменения условий технологического процесса являются зоны, при попадании в ко-



**Рис. 1. Схема адаптивной системы программного управления:**

YA — устройство адаптации; ОСУ — основная система управления; ОУ — объект управления;  $U1$  — управляющее воздействие для изменения программы ОСУ;  $U2$  — управляющее воздействие на ОУ; СУ — система управления;  $F$  — возмущающее воздействие;  $\bar{x}_{вх}$ ,  $\bar{x}_{вых}$  — входной и выходной сигналы соответственно

которые АдСУ увеличивает скорость подачи рабочего органа. Например, при выполнении монтажа проволочных соединений в корпусной интегральной микросхеме (ИМС) скорость координатного стола  $v_{кc}$  в случае образования петли 4 ограничена и задается программой (рис. 2). При переходе к следующей паре контактных площадок 1, 2 скорость координатного стола возрастает. При  $v_{кc} = 0$  идет сварка. ТВ-датчик дает сигнал на увеличение скорости  $v_{кc}$  после образования проволочной петли и сварки. Увеличение  $v_{кc}$  в зоне перехода проводится за счет частоты управляющих импульсов, подводимых к шаговому двигателю (ШД). Так меняется скорость перемещения координатного стола с установленным на нем корпусом ИМС.



**Рис. 2. Адаптивная система управления скоростью подачи рабочего органа:**

$v_{кc}$  — скорость координатного стола (КС); ТВД — ТВ-датчик; БУШД — блок управления шаговым двигателем (ШД); 1, 2 — контактные площадки; 3 — сварочная игла; 4 — проволочная петля после сварки

Адаптивные системы управления построены на основе двух принципов:

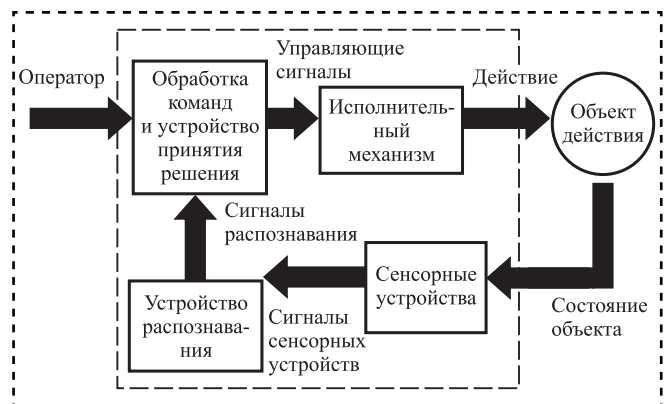
- АдСУ с оптимизацией, в которой задается показатель эффективности технологического процесса (например, производительность);
- АдСУ с ограничениями, которые накладываются на измеряемые переменные (скорость рабочего органа подстраивается так, чтобы значения переменных оставались ниже уровня заданных ограничений).

Преимущества АдСУ: уменьшение времени цикла обработки (от 20 до 60 %) и увеличение срока службы рабочего органа.

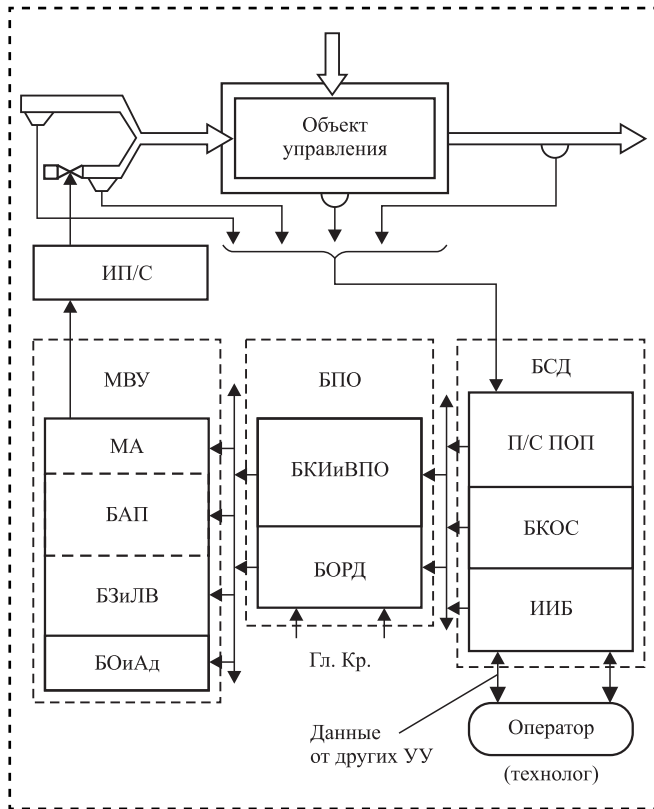
Структурная блок-схема интеллектуальной технологической системы представлена на рис. 3.

Создание нового поколения средств адаптации имеет целью надделение сборочных комплексов способностью к самообучению и распознаванию образов. В интеллектуальных системах поведение "объекта-системы" может быть описано нематематической базой знаний, например, моделью, основанной на правилах, на нечеткой логике или нейронных сетях. Обобщенная архитектура промышленных интеллектуальных систем представлена на рис. 4.

В целом система принятия решений и управления должна реализовать следующие основные функции: сбор данных и их предварительная (первичная) обработка; выработка управлений; обучение и адаптация; исполнение управлений. В общем случае, системные данные могут поступать от измерительных датчиков, через человеко-машинный интерфейс, а также от других уровней управления. Если в некоторых технологических процессах невозможно наблюдать переменные в реальном режиме времени с измерительных датчиков, то информация соз-



**Рис. 3. Структурная блок-схема интеллектуальной технологической системы**



**Рис. 4. Структура промышленной интеллектуальной системы:**

ИП/С — исполнительная подсистема; МВУ — механизм выработки управлений; БПО — блок предварительной обработки; БСД — блок сбора данных; МА — математические алгоритмы; БАП — блок ассоциативной памяти; БЗиЛВ — блок знаний и логического вывода; БОиАд — блок обучения и адаптации; БКИиВПО — блок кодирования информации и выделения признаков образца; БОРД — блок оценки результатов деятельности; Гл.Кр. — глобальный критерий; УУ — уровень управления; П/С ПОП — подсистема прямого оценивания переменных; БКОС — блок косвенного оценивания состояния; ИИБ — интеллектуальный интерфейсный блок

дается блоком косвенной оценки состояния на основе наблюдений за входными и выходными сигналами "объекта-системы". При необходимости может использоваться обработка сигналов, по которым осуществляется поиск в базе знаний.

Механизм выработки управлений выполняет расчет управляющих воздействий на основе собранных системных данных и знаний. В системе управления, основанной на "нематематических" знаниях, процесс обработки данных включает кодирование и декодирование сигналов, ассоциативное запоминание и логический вывод, связанный с математическими алгоритмами числового, многозначного (нечеткого) или символического вида. В системах же

управления, основанных на математическом моделировании, процесс обработки данных сводится к реализации управления с необходимыми численными расчетами.

Функция обучения и адаптации необходима для поддержания функционирования всей системы на удовлетворительном уровне, даже если внешние условия системы находятся в довольно нестабильном состоянии. Чтобы создать робастную и адаптивную систему управления, математическая модель "объекта-системы", алгоритм управления, база знаний и другие инструменты выработки управлений должны быть автоматически адаптированы к изменениям внешней среды через идентификацию, логический вывод, приобретение знаний и обучение.

Исполнительная подсистема представляет собой интеллектуальный адаптивный комплекс исполнительных устройств, который осуществляет функцию гибкой реализации выработанных управляющих воздействий с учетом конкретной ситуации, с изменением характеристик и режимов работы исполнительных органов.

Искусственный интеллект понимается как "автоматизированный интеллект", т.е. интеллект, создаваемый компьютером. Автоматизированные интеллектуальные системы решают сложные (значительные, комплексные, чрезвычайно масштабные) задачи необычным человекоподобным способом. При этом наличие эвристики является одной из ключевых их характеристик. К этим системам применяется принцип Неймана, согласно которому они имеют отдельные пассивные (база знаний, база данных) и активные (менеджер базы знаний, дедуктивная машина) интеллектуальные элементы. Дедуктивная машина (обрабатывающий элемент) использует содержание базы знаний для вывода новых элементов знаний путем логического вывода.

Обобщенная структура интеллектуальной СУ сборочного комплекса представлена на рис. 5. Начальная функция СУ посвящена сбору данных и их первичной обработке. Данные играют ключевую роль в системах управления и принятия решений.

Структура интеллектуального интерфейса показана на рис. 6.

На практике используются двух- и трехуровневые СУ сборочными участками и линиями, включающими сборочные центры, типовые





Рис. 5. Обобщенная структура интеллектуальной системы управления

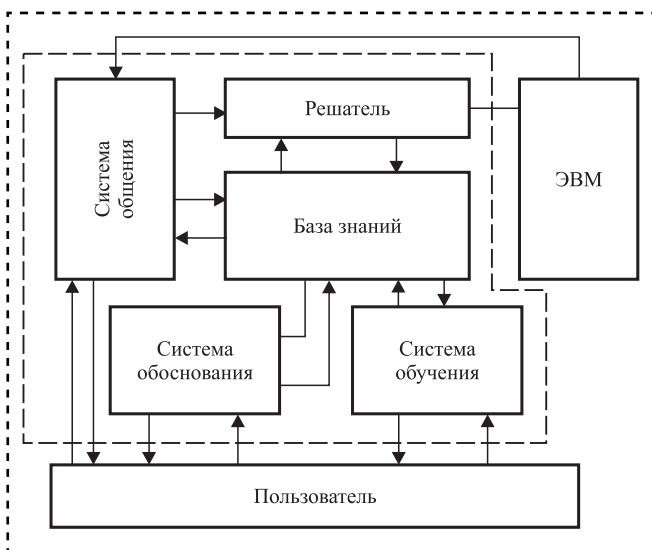


Рис. 6. Структура интеллектуального интерфейса

сборочные модули линий, транспортно-накопительную систему и комплект вспомогательного оборудования. Подобные системы управления по своим функциональным возможностям относятся к управляющим вычислительным комплексам (УВК). На *первом уровне* располагаются локальные СУ технологическим оборудованием,

к которым относятся микропроцессорные системы, программируемые контроллеры и терминальные устройства автоматизированных рабочих мест. На *втором уровне* осуществляется управление группой оборудования и локальной вычислительной сетью.

*Третий уровень* представляет собой сетевую СУ, которая обеспечивает информационную связь между центральной ЭВМ (ЦЭВМ) УВК и большой ЭВМ систем централизованного управления производством.

Интеллектуальные сборочные системы поднимают общий технологический уровень и эффективность сборочных производств.

### Заключение

Сборка основной номенклатуры изделий может осуществляться на интеллектуальных линиях нового поколения со сменным набором мехатронных модулей от загрузки-выгрузки до контроля и диагностирования. В наиболее совершенных адаптивных системах управления (с элементами искусственного интеллекта) обеспечивается автономное функционирование управляемого объекта в соответствии с поставленной в общей форме целью, т.е. в условиях неопределенности и изменчивости внешней среды. Адаптивные системы управления используют в вычислительно-управляющих комплексах с измерением определенных выходных параметров и выработкой управляющих воздействий по результатам измерений.

Дальнейшее совершенствование сборочных комплексов может идти путем применения систем речевого диалога "человек — ЭВМ" с синтезом речевых сообщений и анализом устных команд для ЭВМ.

### Библиографический список

1. Иванов А.А. Автоматизированные сборочные системы: учебник. М.: ФОРУМ, 2018. 336 с.
2. Макаров И.М., Лохин В.М., Манько С.В., Романов М.П. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2012. 336 с.
3. Ручкин В.Н., Фулин В.А. Универсальный искусственный интеллект и экспертные системы. М.: БХВ-Петербург, 2011. 240 с.

**О.Е. Железникова**, канд. техн. наук, **С.А. Амелькина**, канд. техн. наук  
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск),  
**С.А. Микаева**, д-р техн. наук, **А.С. Микаева**, канд. экон. наук, **А.А. Дюкин**  
(МИРЭА — Российский технологический университет, Москва)  
E-mail: [mailto:mikaeva@npo.lit.ru](mailto:mailto:mikaeva@npo.lit.ru)

## Сборка кварцевдувного стола и газовой горелки

*Описана сборка кварцевдувного стола и газовой горелки. Проанализированы стандартные методы производства и испытания кварцевдувных столов и газовых горелок. На основании проведенных исследований отработаны технические характеристики и комплектация оборудования.*

*The article describes the assembly of a quartz blowing table and a gas burner. Standard methods of production and testing of quartz blowing tables and gas burners were analyzed. In the course of work and on the basis of the conducted research, the technical characteristics and equipment configuration were worked out.*

**Ключевые слова:** сборка, кварцевдувный стол, газовая горелка, технические характеристики, оборудование, порядок работы.

**Keywords:** assembly, quartz blowing table, gas burner, technical characteristics, equipment, operating procedure.

Один из способов профилактики инфекционных заболеваний — технология ультрафиолетового (УФ) обеззараживания воды, воздуха и поверхностей. УФ-излучение — электромагнитное излучение, занимающее диапазон между рентгеновским и видимым излучением (диапазон длин волн 100...400 нм). Различают несколько участков спектра УФ-излучения, имеющих разное биологическое воздействие:

УФ-А — 315...400 нм;

УФ-В — 280...315 нм;

УФ-С — 200...280 нм;

вакуумный УФ — 100...200 нм.

Диапазон УФ-С часто называют бактерицидным из-за его высокой обеззараживающей эффективности по отношению к бактериям и вирусам. Максимум бактерицидной чувствительности микроорганизмов приходится на длину волны 265 нм [1—4]. Поэтому производство оборудования и установок для изготовления источников УФ-излучения выходит на новый уровень [5, 6].

Рассмотрим основное оборудование для производства УФ-ламп — кварцевдувный стол и газовые горелки.

К работе со столом кварцевдувным допускают лиц, прошедших инструктаж по технике безопасности и ознакомленных с устройством стола кварцевдувного, правилами его эксплуатации, имеющих допуск к работе с газами и прошедших курс обучения работе с газовыми горелками. На работу стола кварцевдувного распространяются все требования по технике безопасности при эксплуатации электрооборудования, питание которого осуществляется напряжением 380 В частотой 50/60 Гц [7—9]. Корпусы стола кварцевдувного, пульта управления и форвакуумного насоса должны быть надежно заземлены. При возникновении пожара оборудование следует обесточить и перекрыть подачу газов. Тушение оборудования следует проводить средствами пожаротушения, не проводящими электрический ток. Эксплуатировать стол кварцевдувный следует только при включенной вентиляции.

### *Технические характеристики стола кварцевдувного*

Габаритные размеры

(длина×ширина×высота), мм,

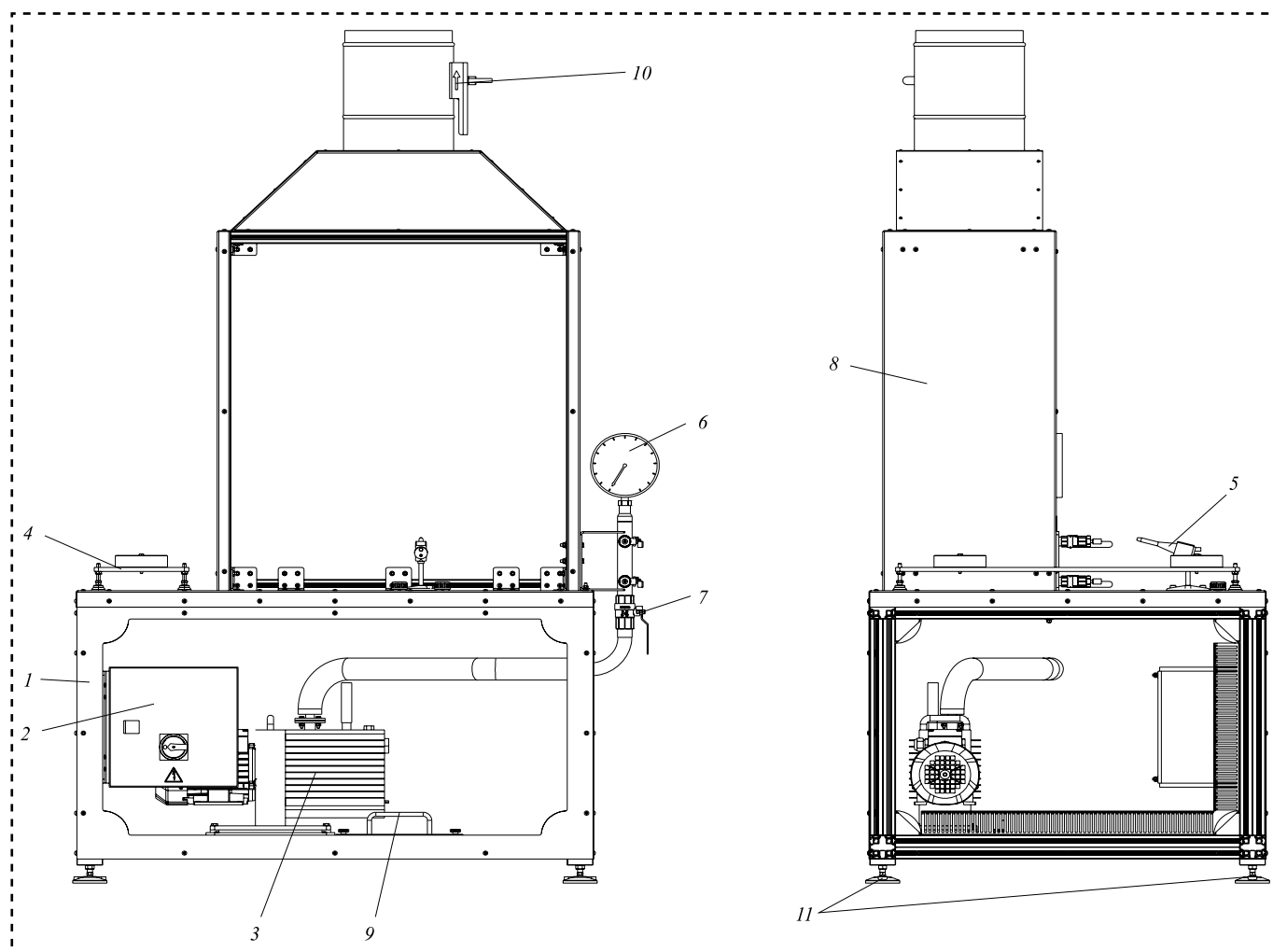
не более. . . . . 1354×924×2131

Материал каркаса . . . . . Алюминиевый профиль с панелями из дюралюминиевого сплава Д16Т



Материал корпуса пульты управления . . .	Окрашенная, гальванически обработанная сталь
Масса, кг, не более . . . . .	165
Тип используемого форвакуумного насоса . . . . .	2 НВР-5ДМ
Топливная рабочая среда . . . . .	Метан (природный газ)
Давление природного газа, МПа. . . . .	0,1...0,5
Расход природного газа, м <sup>3</sup> /ч . . . . .	0,5...2,0
Давление кислорода, МПа . . . . .	0,1...1,0
Расход кислорода, м <sup>3</sup> /ч . . . . .	1,5...6,0
Подача природного газа и кислорода . . .	От общей сети
Тепловыделение в пульте управления, Вт, не более . . . . .	50
Степень пыле- и влагозащитности пульта управления . . . . .	IP 54
Напряжение питания, В . . . . .	380±38
Частота питающего напряжения, Гц. . .	50
Максимальная потребляемая мощность, Вт, не более. . . . .	550

Климатическое исполнение . . . . .	УХЛ (изделие предназначено для эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом)
Категория размещения . . . . .	4 (изделие предназначено для эксплуатации в закрытых отапливаемых и вентилируемых помещениях по ГОСТ 15150—69)
Температура окружающего воздуха, °С . . .	1 до 35
Относительная влажность окружающего воздуха при +25 °С, %, не более . . . . .	80



**Рис. 1. Стол кварцевый:**

1 — стол; 2 — пульт управления; 3 — форвакуумный насос; 4 — калибр; 5 — горелка; 6 — мановакуумметр; 7 — кран газовый (G1); 8 — экран; 9 — поддон; 10 — воздушный клапан (Ø250 мм); 11 — регулируемая опора

Стол кварцевудувный (рис. 1) 1 установлен на регулируемых опорах 11. Пульт управления 2 на передней панели стола предназначен для подачи питания и управления форвакуумным насосом 3, установленным на нижней панели стола для создания вакуума в целях проверки кварцевых колб на герметичность. На поверхности стола расположен калибр 4 для проверки и контроля выполнения технологических операций по выпуску продукции, газовая горелка 5 и экран 8. Воздушный клапан 10 в верхней части экрана подключен к вытяжной вентиляции. Оценка натекания откачанной колбы осуществляется с помощью мановакуумметра 6. Газовый кран 7 предназначен для отсекаания кварцевой колбы от форвакуумного насоса 3. В нижней части стола съемный поддон 9 предназначен для предотвращения разлива масла при аварийной утечке из форвакуумного насоса.

*Технические характеристики форвакуумного насоса*

Тип форвакуумного насоса. . . . .	2 НВР-5ДМ
Напряжение питания, В. . . . .	380
Частота питающего напряжения, Гц. . . . .	50
Потребляемая мощность, Вт. . . . .	550
Подача, л/с. . . . .	5,5
Остаточное давление, Па. . . . .	2,6
Частота вращения ротора, мин <sup>-1</sup> . . . . .	1430

Количество рабочей жидкости, заливаемой в насос, л. . . . .	1,2
Масса без учета рабочей жидкости, кг. . . . .	26
Габаритные размеры, мм. . . . .	555×170×280

Пульт управления (рис. 2) представляет собой корпус 1, на двери 2 которого установлены: главный выключатель 3 для подачи/отключения питания; кнопки с подсветкой "ПУСК" 4 включения и "СТОП" 5 выключения форвакуумного насоса.

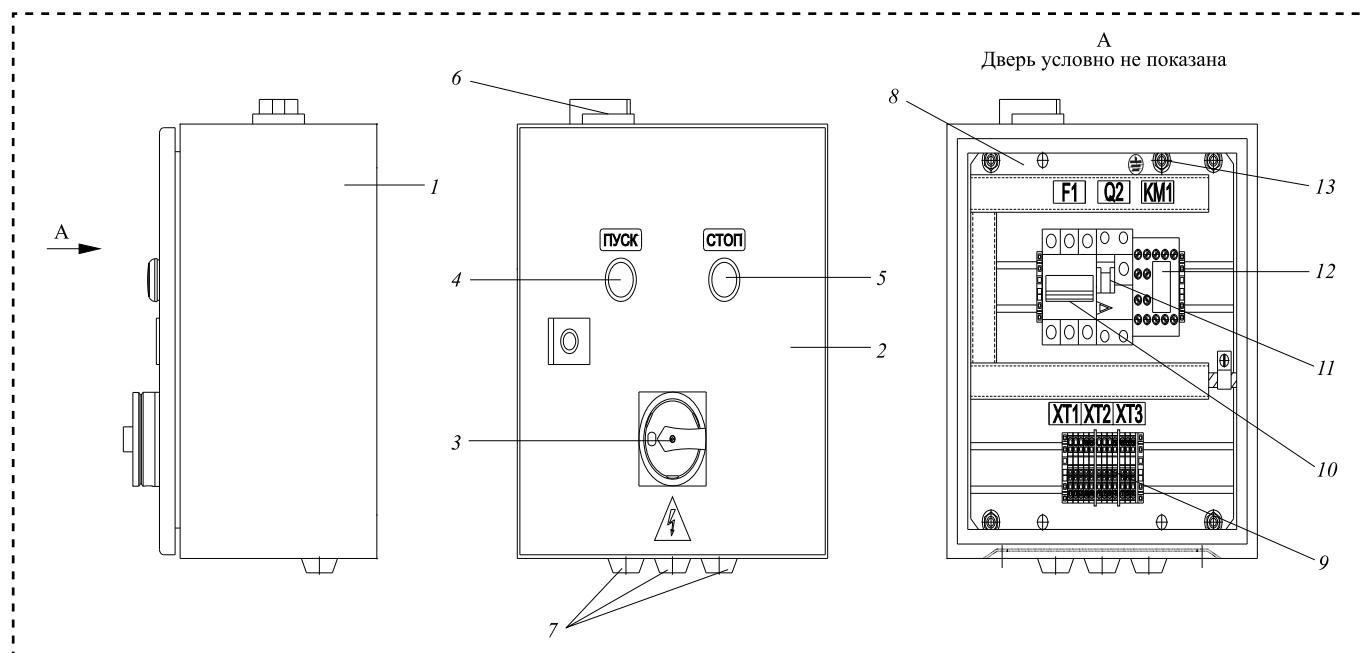
На верхней панели корпуса 1 пульта установлена розетка 6 для питания внешних устройств, а на нижней — кабельные вводы 7 для подвода/отвода кабелей.

На монтажной панели 8 внутри пульта управления расположены элементы системы контроля и управления оборудованием стола кварцевудувного и силовой коммутации.

Для заземления пульта управления предназначены шпильки заземления 13, установленные на корпусе пульта и на монтажной панели.

Монтаж и сборка оборудования для стола кварцевудувного:

— установить стол и проверить горизонтальность его размещения строительным уровнем, при необходимости отрегулировать расположение стола с помощью регулируемых опор 11 (см. рис. 1);



**Рис. 2. Пульт управления:**

1 — корпус; 2 — дверца; 3 — главный выключатель; 4 — кнопка с подсветкой "ПУСК" (зеленая); 5 — кнопка с подсветкой "СТОП" (красная); 6 — розетка (~220 В, 16 А); 7 — кабельные вводы; 8 — монтажная панель; 9 — блок клеммных зажимов; 10 — автоматический выключатель; 11 — дифференциальный выключатель; 12 — контактор; 13 — шпилька заземления



— подсоединить воздушный клапан 10 (см. рис. 1) к воздуховоду существующей системы вентиляции;

— закрепить на передней панели стола пульт управления 2 (см. рис. 1);

— установить в нижней части стола форвакуумный насос 3 и подключить его к мановакуумметру 6 (см. рис. 1);

— подключить горелку 5 к магистралям природного газа и кислорода;

— подключить к пульта управления пятипроводный кабель питания напряжением 380 В, частотой 50 Гц;

— подсоединить кабели к форвакуумному насосу.

Порядок работы кварцевдувного стола:

открыть воздушный клапан 10 (см. рис. 1);

включить главный выключатель 3 (см. рис. 2);

включить горелку 5 (см. рис. 1);

заглушить отверстия в кварцевой колбе;

разогреть горелкой 5 кварцевую колбу в месте, на котором необходимо расположить штенгель, до получения отверстия;

разогреть отверстие в колбе и торец штенгелевой трубки до температуры размягчения кварца и присоединить торец штенгелевой трубки к отверстию кварцевой колбы;

надеть вакуумный шланг на штенгель и включить вакуумный насос, нажав на кнопку 4 "ПУСК" (см. рис. 2);

открыть кран 7 (см. рис. 1) и откачать колбу;

закрывать кран 7 (см. рис. 1) и проконтролировать по показанию мановакуумметра отсутствие натекания;

при необходимости закрыть воздушный клапан 10 (см. рис. 1);

при необходимости выключить главный выключатель 3 (см. рис. 2);

для аварийного отключения питания стола кварцевдувного выключить главный выключатель 3 (см. рис. 2) пульта управления и перекрыть подачу газов.

К работе с горелкой допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности, имеющие допуск к работе с газами и прошедшие курс обучения работе с газовыми горелками. Эксплуатировать горелку следует только при включенной вентиляции.

#### Технические характеристики

#### Горелка с широким пламенем

Топливная рабочая среда . . . . .	Метан (природный газ)
Давление природного газа, МПа. . . . .	0,1...0,5
Давление кислорода, МПа . . . . .	0,1...1,0

Расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч . . . . . 0,5...2,0

Расход кислорода, м<sup>3</sup>/ч . . . . . 1,5...6,0

Температура пламени в средней  
зоне, °С . . . . . 2500

#### Горелка с остроконечным пламенем

Топливная рабочая среда . . . . . Метан  
(природный газ)

Давление природного газа, МПа. . . . . 0,1...0,5

Давление кислорода, МПа . . . . . 0,1...1,0

Расход природного газа, м<sup>3</sup>/ч . . . . . 0,5...2,0

Расход кислорода, м<sup>3</sup>/ч . . . . . 1,5...6,0

Температура пламени  
в средней зоне, °С . . . . . 2500

Климатическое исполнение . . . . . УХЛ

Категория размещения . . . . . 4 по  
ГОСТ 15150—69

Температура окружающего  
воздуха, °С . . . . . 1...35

Относительная влажность  
окружающего воздуха при +25 °С,  
%, не более . . . . . 80

Конструкция горелки (рис. 3) представляет собой две соединенные вместе горелки. Нижняя горелка закреплена на основании 1 с помощью шарнирной стойки 2 и винта 12. Основание 1 фиксируют на горизонтальной поверхности в специальные отверстия с помощью крепежа. Шарнирное соединение позволяет менять положение горелки относительно рабочей поверхности. Шарнирная стойка 2 соединена со стволом 5 нижней горелки, к которому подсоединена головка горелки 11, предназначен-

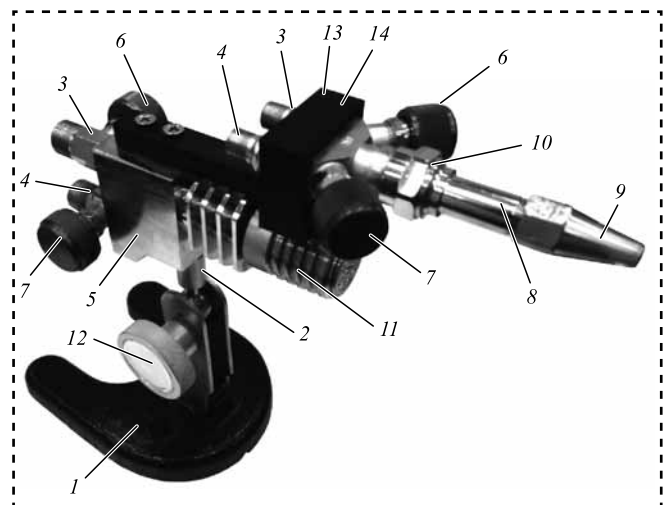


Рис. 3. Устройство горелки:

1 — основание; 2 — шарнирная стойка; 3 — штуцеры для природного газа; 4 — штуцер для кислорода; 5 — ствол нижней горелки; 6 — вентили подачи кислорода; 7 — вентили подачи природного газа; 8 — наконечник; 9 — мундштук; 10 — накидная гайка наконечника; 11 — головка; 12 — винт; 13 — крепление; 14 — ствол верхней горелки





ная для создания широкого пламени. Также на стволе 5 первой горелки с помощью крепления 13 установлен ствол 14 верхней горелки, к которому с помощью накидной гайки 10 присоединен наконечник 8, состоящий из трубки, смесителя и съемного мундштука 9. В смесителе происходит смешивание кислорода и природного газа. Образовавшаяся смесь движется по трубке наконечника к выходным каналам мундштука 9, на выходе из которого образуется остроконечное пламя. На стволах 5 и 14 горелок расположены штуцера 3, предназначенные для подключения гибких шлангов подачи природного газа, и штуцера 4 — гибких шлангов подачи кислорода. Регулирование мощности пламени осуществляется с помощью вентилей управления подачей кислорода 6 и природного газа 7.

Порядок эксплуатации горелки следующий: перед работой необходимо убедиться в исправности оборудования и проверить:

- герметичность подсоединения газовых шлангов, всех разъемных и паяных соединений;
- тип газовых шлангов: газовые шланги должны быть типа I для природного газа и типа III для кислорода по ГОСТ 9356;
- правильность подвода кислорода и природного газа;
- установить рабочее давление газов в соответствии с техническими характеристиками горелок и технологическим процессом;

приоткрыть вентиль подачи природного газа 7 необходимой горелки и зажечь природный газ, приоткрыть вентиль подачи кислорода 6 необходимой горелки и отрегулировать мощность пламени;

выключить подачу газов в обратном порядке: закрыть вентиль кислорода 6, затем вентиль природного газа 7;

для продувки мундштука 9 или головки 11 горелки от остатков природного газа необходимо открыть на несколько секунд вентиль подачи кислорода 6 и закрыть его.

В комплекс работ по техническому обслуживанию горелки входит: смазка вентилей 6 и 7 маслом, предназначенным для смазки газовой арматуры; затяжка накидных гаек вентилей 6 и 7 в случае их негерметичности; периодическое очищение мундштука 9 от нагара промыванием его в бензине или другом растворителе. После промывки мундштука его необходимо тщательно продуть сжатым воздухом;

периодическое очищение головки 11 от нагара промыванием головки в бензине или другом растворителе. После промывки головки ее необходимо тщательно продуть сжатым воздухом.

Данное оборудование обеспечивает выполнение объема производства по выпуску бактерицидных ламп. При проектировании и изготовлении электротехнического оборудования применяют комплектующие ведущих мировых производителей. Применение высококачественных материалов существенно повышает эффективность эксплуатации оборудования.

Новейшие технические решения в сочетании с продуманным дизайном позволяют успешно интегрировать данное оборудование в системы комплексного автоматизированного управления.

Внедрение данного оборудования обеспечивает выполнение санитарно-эпидемиологических норм по воде и воздуху в помещениях, многократно уменьшая концентрацию микроорганизмов в воздушной среде. Это позволяет, прежде всего, существенно снизить заболеваемость людей, находящихся в помещениях, а также улучшить качество готовой продукции и сырья на производствах, сократить количество химических препаратов, применяемых при традиционных способах дезинфекции помещений.

### Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. 150 с.
2. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС, 2018. 135 с.
3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: РУСАЙНС, 2019. 186 с.
4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Промышленная электроника. Актуальные электронные приборы, устройства, установки и системы М.: РУСАЙНС, 2020. 172 с.
5. **Ашратов А.А., Микаева С.А., Микаева А.С.** Прибор для контроля сборки компактных люминесцентных ламп // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 2. С. 23—26.
6. **Железникова О.Е., Амеликина С.А., Микаева С.А., Микаева А.С.** Облучатели бактерицидные // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 3—6.
7. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.
8. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Промышленная электроника. Импульсные устройства и основы микропроцессорной техники. Казань: Бук, 2019. 250 с.
9. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Промышленная электроника. Электрические машины в приборостроении. Казань: Бук, 2020. 166 с.

П.А. Головкин, канд. техн. наук (АО "Плутон", Москва),  
А.В. Логачёв, канд. техн. наук (ОАО "Композит", Московская область, г. Королёв)  
E-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru

## Эффективность горячего газостатирования прутков из сплава НВ5-ВП для изготовления деталей СВЧ-устройств

*Исследованы возможности залечивания дефектов в прутках никель-вольфрамового сплава вакуумной плавки НВ5-ВП методом горячего газостатирования.*

*The possibilities of healing of defects in the NV5-VP bars made from vacuum-melted nickel-tungsten alloy by the method of hot gasostating are being studied.*

**Ключевые слова:** электровакуумные СВЧ-приборы, никель-вольфрамовый сплав, прутки, микроструктура, газовые поры, высокотемпературное газостатирование, фазовые превращения, залечивание дефектов, обрабатываемость, стружка.

**Keywords:** electrovacuum microwave devices, nickel-tungsten alloy, bars, microstructure, pinholes, high-temperature gasostating, phase change, healing of defects, machinability, chippings.

Одно из главных требований к материалам, применяемым для изготовления деталей вакуумно-плотной зоны специальных СВЧ-приборов, — вакуумная плотность и отсутствие газовыделения при рабочих температурах, достигающих 400 °С [1, 2]. Распространенным материалом для изготовления жаропрочных деталей рабочей зоны является никель-вольфрамовый сплав вакуумной плавки марки НВ5-ВП (основа Ni + 5 % W) [3]. Требование малого газовыделения нашло свое отражение в технических условиях на этот материал, оговаривающих максимально допустимое остаточное содержание газов: кислорода — не более 0,005 %, водорода и азота — не более 0,0001 % [3]. В результате на протяжении гарантийного срока эксплуатации, составляющем 15 лет, в рабочей зоне СВЧ-приборов должен обеспечиваться вакуум не более  $6,5 \cdot 10^{-5}$  Па [2]. Производственный опыт АО "Плутон" показывает частое несоответствие применяемых полуфабрикатов требованиям вакуумной плотности и остаточного газовыделения [1], поэтому исследовали влияние высокотемпературного изостатического прессования (ГИП) на качество материала прутков из сплава НВ5-ВП.

### Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Уплотнение материала прутков проводили в промышленном газостате ОАО "НПО "Композит" по режиму: нагрев до температуры 1160 °С со скоростью 8 °С/мин в среде аргона, выдержка в течение 3 ч при давлении 158 МПа (~1600 ат), далее охлаждение до 160 °С со скоростью 4 °С/мин. Исходный размер зерна в среднем составлял 30...70 мкм в поперечном направлении, и до 100...150 мкм в долевом (рис. 1). Структура материала прутков характеризовалась наличием многочисленных газовых пор либо сферических, либо слегка вытянутых в направлении прокатки, но не более чем в отношении 3/1, с поперечным размером 5...10 мкм (рис. 2) [3]. Перед загрузкой прутки обезжировали путем ультразвуковой мойки, после загрузки рабочее пространство газостата дважды продували аргоном. Также проводили исследование по второму режиму с выдержкой в течение 2 ч при температуре 930 °С.

Горячее газостатирование ввиду высокой температуры процесса резко изменяет структуру материала прутков, превращая исходную направленную деформированную структуру

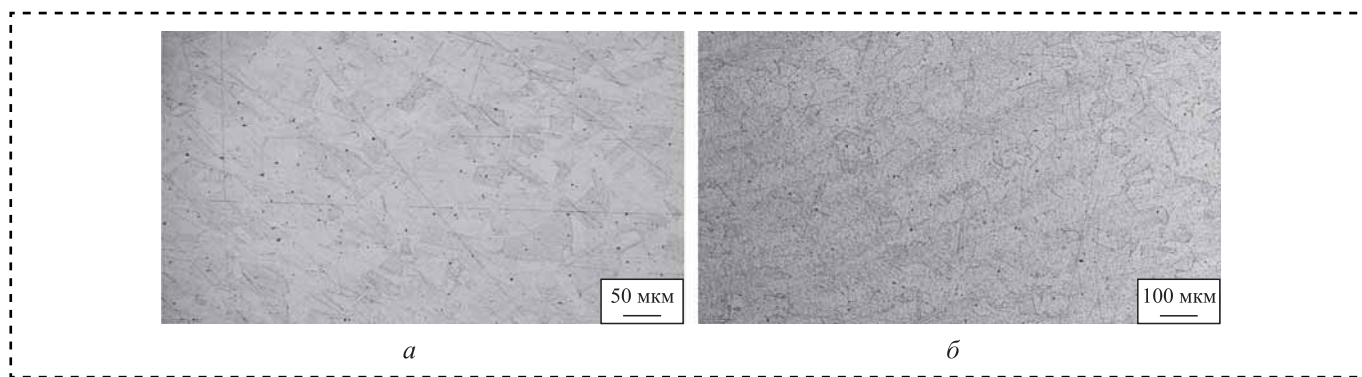


Рис. 1. Микроструктура прутка до (а) и после (б) ГИП,  $\times 50$

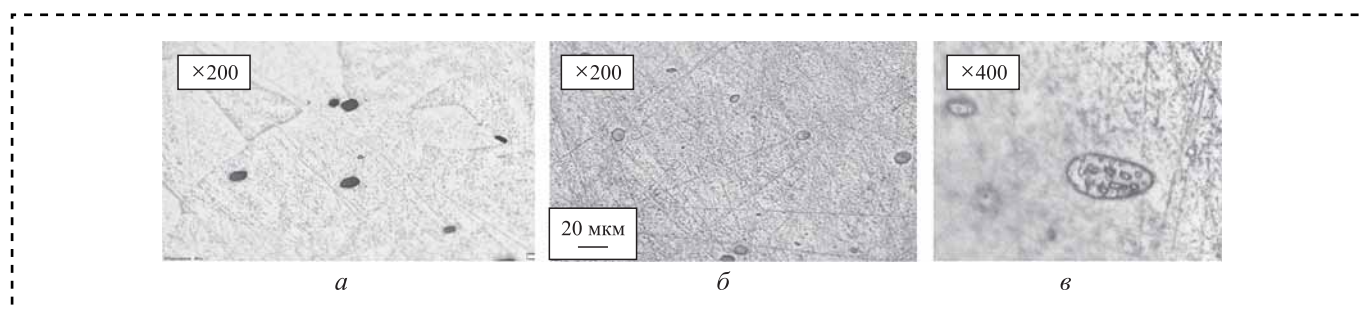


Рис. 2. Исходные (а) залеченные (б, в) поры

в ненаправленную рекристаллизованную с размером зерна 150...200 мкм. Газостатическая обработка по первому режиму эффективно залечивает газовые поры, заполняя их металлическим материалом, но при этом частично сохраняя исходную твердую окисленную газами "скорлупу", в результате чего поры не схлопываются, сохраняя свой исходный силуэт. Уменьшение температуры ГИП до 930 °С уже не позволяет залечить газовые поры, и эффект ограничивается рекристаллизацией исходных зерен.

Токарная обработка прошедших ГИП и исходных прутков показала, что горячее газостатирование является эффективным инструментом улучшения обрабатываемости сплава НВ5-ВП резанием. Фактура обработанной поверхности становится более стабильной и однородной, число поверхностных дефектов качественно умень-

шается (рис. 3). Одновременно, сход стружки становится более равномерным, сливным, а сама она — менее напряженной, с меньшим количеством микроизломов (рис. 4) [4]. Дефекты типа задиров и вырывов на поверхности обработанных деталей стали следствием неоднородности материала заготовок в местах встречи инструмента с газовыми порами (см. рис. 3), когда из-за резкого изменения нагрузки на резец происходило налипание металлического материала на его заднюю плоскость. ГИП облагораживает поверхность обработанных деталей и делает процесс их обработки резанием более стабильным и предсказуемым.

ГИП не может уменьшить абсолютное содержание газов, однако позволяет эффективно "запечатать" их в уплотненном металлическом материале.

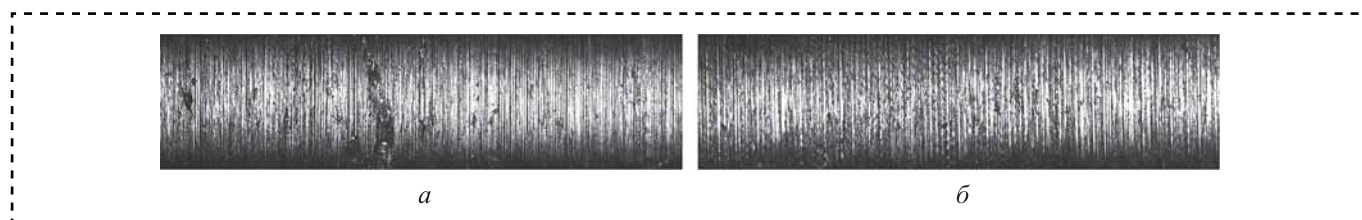


Рис. 3. Фактура обработанной поверхности прутка до (а) и после (б) ГИП,  $\times 50$



Рис. 4. Типичная стружка от прутка диаметром 8 мм до (а) и после (б) ГИП

В сочетании с процессом рекристаллизации, с образованием новых, уплотненных высоким давлением границ, в процессе ГИП ограничивается перемещение как растворенных, так и находящихся в порах газов, тем самым повышается надежность и качество работы электровакуумного прибора [1, 5, 6].

### Выводы

1. Горячее изостатическое прессование — эффективный способ повышения вакуумной плотности специальных материалов, применяемых в электровакуумных приборах специального назначения, в частности, сплава НВ5-ВП.

2. Залечивание газовых пор происходит путем их заполнения металлическим материалом, по-видимому, с преобладанием диффузионного механизма. При этом исходная твердая окисленная корка поры почти не разрушается, сохраняя свою геометрию.

3. Применение ГИП эффективно улучшает обрабатываемость материала прутков из сплава НВ5-ВП, в разы уменьшая число дефектов на поверхности проточенных заготовок. При этом

сходящая стружка становится менее напряженной, сливной.

4. Эффективным режимом ГИП-прутков из сплава НВ5-ВП является выдержка в течение 2 ч при температуре 1160 °С и давлении 158 МПа. Понижение температуры процесса до 930 °С не позволяет залечить газовые поры, и его эффект ограничивается рекристаллизацией исходных зерен.

### Библиографический список

1. Черепнин Н.В. Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М.: Советское радио, 1966. 352 с.
2. Самсонов Д.Е. Основы расчета и конструирования магнетронов. М.: Советское радио, 1974. 328 с.
3. СИО.021.025ТУ (ТУ 11—82) Прутки и ленты из никелевого сплава вакуумной плавки марки НВ5-ВП. М.: АО "Плутон". 6 с.
4. Амосов И.С., Скраган В.А. Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке / под ред. М.А. Ансера. М.—Л.: Машгиз, 1958. 90 с.
5. Бокштейн С.З. Диффузия и структура металлов. М.: Металлургия, 1973. 208 с.
6. Структура межкристаллитных и межфазных границ / В.М. Косевич и др. М.: Металлургия, 1980. 265 с.





**В.Е. Иванов, П.В. Пучков**, канд-ты техн. наук  
(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России)  
E-mail: vitaliyivanov@yandex.ru

## Использование современных методов исследования при разработке новых конструкций зажимов для восстановления работоспособности напорных пожарных рукавов и оценка их технического состояния на основе компьютерного моделирования

*Разработаны современные рациональные конструкции устройств для восстановления работоспособности напорных пожарных рукавов, в которых учтены такие характеристики, как малые габаритные размеры, высокая надежность и долговечность, низкая металлоемкость и др. Исследовано новое техническое решение в конструкции зажимного устройства для оперативной ликвидации протечек рукавных линий во время пожаротушения. При разработке данных устройств использовали технологии трехмерного моделирования, 3D-печати, а также инструменты систем автоматизированного проектирования для проведения конечно-элементного анализа трехмерной твердотельной модели.*

*This article is devoted to the issues of restoring the performance of fire pressure hoses in a fire when punctures, cuts and fistulas occur. Failure of fire pressure hoses in a fire occurs due to mechanical damage during the laying of main and working lines. In this case, an increase in the working pressure in the bag system leads to the loss of extinguishing agents and the appearance of fistulas, longitudinal and transverse breaks. This article offers a technical solution aimed at developing a new clamp design to restore the performance of a fire pressure hose with a diameter of 55 mm when it is damaged: a puncture or cut. For this purpose, a three-dimensional model of the clamp was developed and its strength analysis was performed using the Autodesk Inventor computer-aided design system. This device will allow you to restore the supply of fire extinguishing agents in the shortest possible time if the pressure hoses are damaged in a fire.*

**Ключевые слова:** пожарный рукав, повреждение, восстановление работоспособности, устройство, зажим, прочностной анализ.

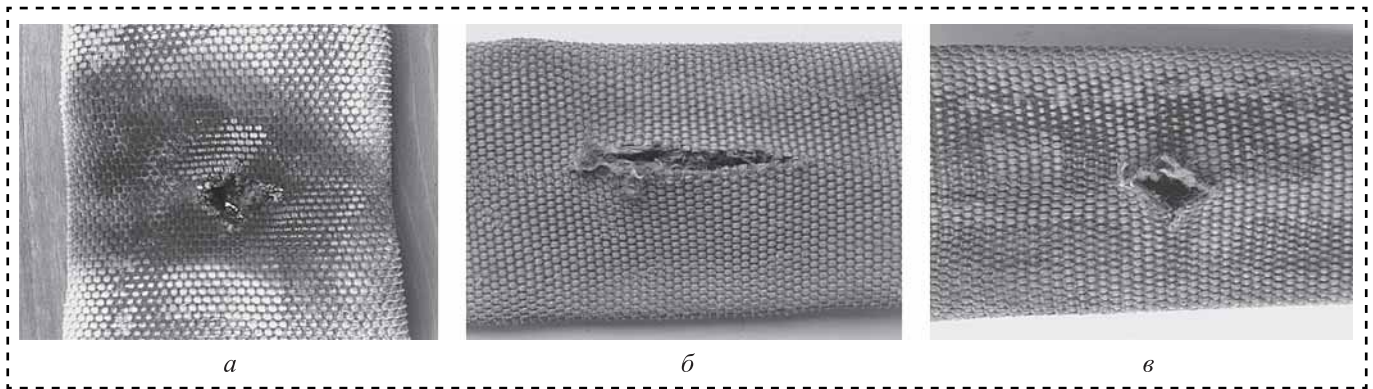
**Keywords:** fire hose, damage, recovery, device, clip, strength analysis.

Напорные пожарные рукава используют значительно чаще, чем другие виды пожарно-технического оборудования, поэтому они являются неотъемлемым оборудованием тушения пожара. По статистике до 85 % отказов пожарного оборудования приходится на долю пожарных напорных рукавов, работающих в экстремальных условиях и подверженных воздействию высоких температур, воды, грунтового загрязнения, острых предметов, абразивных поверхностей, высокому давлению огнетушащего средства внутри рукава и др. Поэтому во время тушения пожаров возникают непредвиденные ситуации при которых напорные рукава получают такие повреждения как: проколы, прожоги, разрывы, свищи, протиры каркаса (рис. 1).

В результате механических повреждений при прокладке магистральных и рабочих линий происходит нарушение герметичности оболочки рукава. Появление свищей, продольных и поперечных разрывов в рукавах в свою очередь ведет к снижению количества или полное прекращение подачи огнетушащих веществ в зону горения, что увеличивает время тушения пожара.

Каждая минута пожара приносит огромный и часто непоправимый материальный ущерб как самому зданию или сооружению, так и материальным ценностям, находящимся в нем. Поэтому, чем оперативнее будет ликвидировано горение, тем меньший ущерб будет нанесен объекту. Поэтому успех в ликвидации пожара





**Рис. 1. Основные виды повреждений напорных рукавов на пожаре:**  
*a* — прогар; *б* — порез; *в* — прокол оболочки

во многом зависит от исправности пожарных рукавов.

Наиболее часто на пожаре используют пожарные напорные рукава диаметром 51 мм для прокладки рабочей линии. При появлении свища на рабочей линии его можно оперативно устранить с помощью зажима (рис. 2).

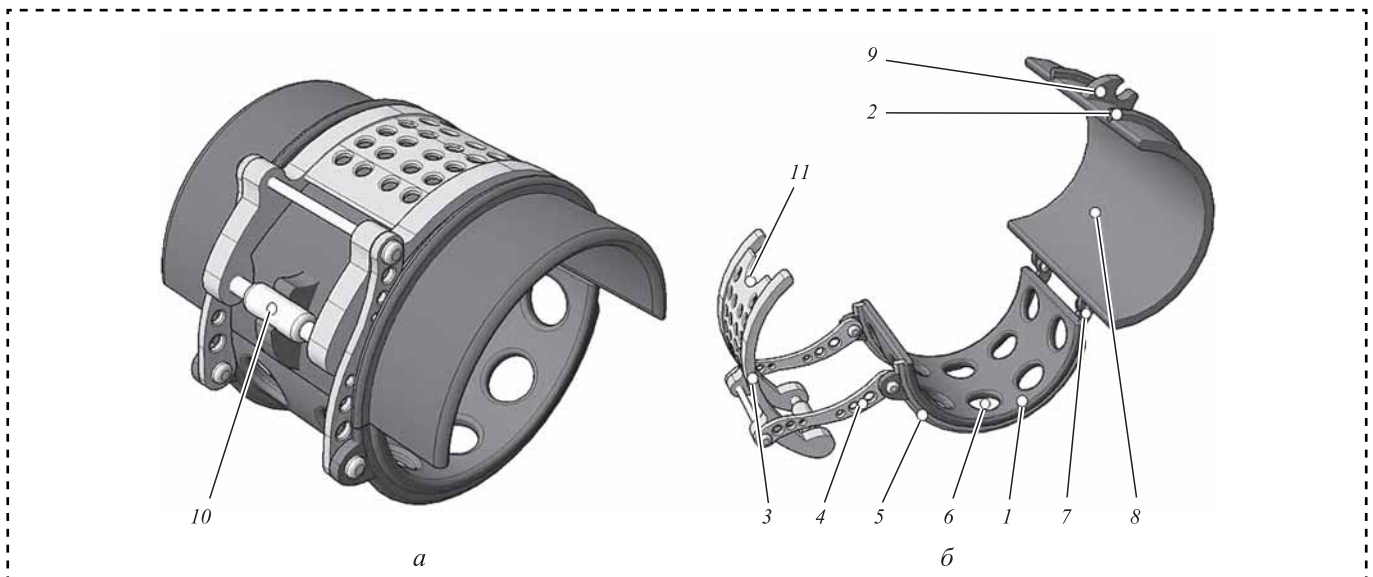
В настоящее время отсутствуют устройства, которые могли бы восстановить работоспособность рукавной линии при поперечном разрыве напорного рукава или при его порезе размером более 100 мм [1].

К новой конструкции зажима для восстановления работоспособности рабочей линии на пожаре предъявляют следующие требования:

- 1) малая масса конструкции;
- 2) быстрота и легкость установки на пожарный рукав;
- 3) коррозионная стойкость;
- 4) надежность и долговечность.

Достоинствами данного устройства являются: отсутствие прямых аналогов, надежность и простота использования, возможность дальнейшего использования поврежденного рукава при тушении пожара, долговечность. Основным недостатком — применение только для одного типа размера рукавов диаметром 55 мм.

Зажим состоит из двух подвижно соединенных полуколец 1 и 2 посредством двух шарниров 7. На верхнем полукольце закреплена



**Рис. 2. Трехмерная модель конструкции рукавного зажима:**

1 — нижнее полукольцо; 2 — верхнее полукольцо; 3 — прижимная скоба; 4 — кронштейн; 5 — ребро жесткости; 6 — перфорация; 7 — шарнир; 8 — прижимная пластина; 9 — замок; 10 — ригель; 11 — "открыватель": *a* — зажим в положении "ЗАКРЫТ"; *б* — зажим в положении "ОТКРЫТ"

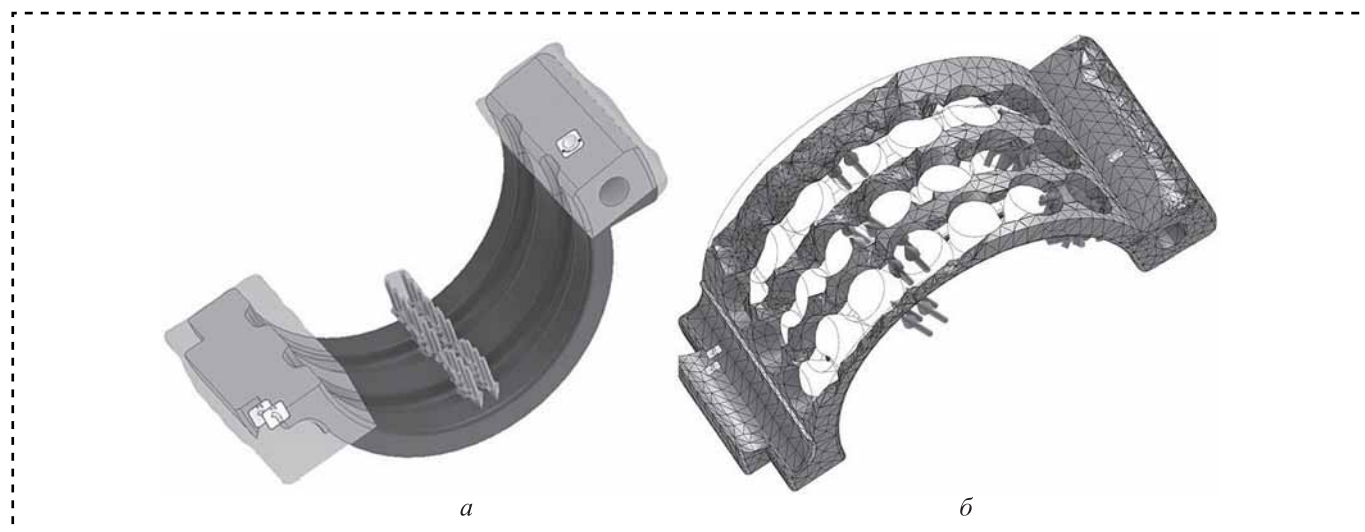
прижимная пластина 8, которая служит для предотвращения утечки огнетушащего вещества из пожарного рукава в случае его пореза или прокола. Зажим надежно фиксируется на пожарном рукаве за счет прижимной скобы 3 и замка 9. Прижимная скоба 3 свободно вращается вокруг оси, прикрепленной на кронштейне 4. Ригель 10 прижимной скобы входит в зацепление с замком 9, а прижимная скоба 3 совмещается с верхним полукольцом. Для раскрытия зажима на прижимной скобе 3 имеется полукруглый вырез "открыватель" 11. Для обеспечения легкости конструкции зажима в нижнем полукольце 1, прижимной скобе 3 и кронштейне 4 выполнена перфорация.

Для проведения прочностного анализа разработанного зажима на первом этапе сравнили современные системы автоматизированного проектирования со встроенными модулями прочностного расчета [6]. Аналитическими исследованиями выявлены достоинства и недостатки различных программных продуктов как отечественного производства, так и зарубежного, и определен оптимальный программный продукт, который кроме модулей для прочностного расчета имеет модуль генератора форм — система автоматизированного проектирования Autodesk Inventor. Алгоритм расчета с помощью модуля генератора форм в программе Autodesk Inventor можно разделить на три этапа: на первом этапе разрабатывается трехмерная модель детали; на втором — готовая модель загружается в модуль расчета, где присваивается

материал, задаются нагрузки и зависимости; на третьем — корректируется исходная модель на основании расчета.

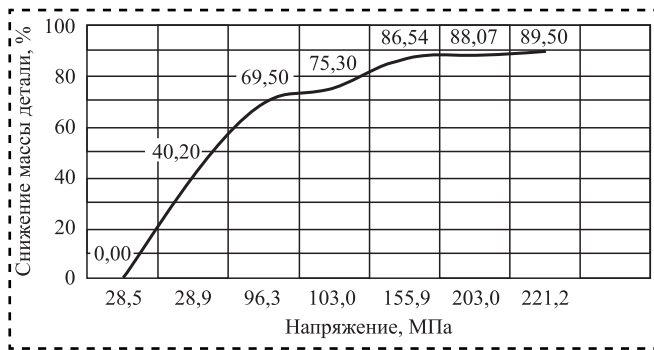
В программе Autodesk Inventor разработали трехмерную модель зажима, проводили прочностной расчет и исследования в генераторе форм для материала силумина АК7Ц9 ГОСТ 1583—93 (алюминиевый литейный сплав, предел прочности на растяжение 176...216 МПа), задали зависимости и приложенные силы (рис. 3, а). Также были указаны области, которые необходимо исключить из расчета. В генераторе форм настроены параметры сетки для обеспечения более точного расчета и заданы параметры для сокращения исходной массы детали в процентах (рис. 3, б).

При проведении исследований с помощью генератора форм программы Autodesk Inventor изменяли параметры сохранения исходной массы (шагом 5 % снижения массы детали). С каждым шагом рассчитанную форму детали добавляли в трехмерную модель, далее при включенном каркасном режиме отображения вида 3D-модель корректировали в соответствии с расчетом [7]. Так как форму детали, ее массу и размер меняли, то после каждого шага вычисляли напряжения, коэффициент запаса прочности, а также деформацию детали при постоянном одинаковом нагружении. При этом допустимое напряжение алюминиевого сплава принято 180 МПа. Исследования выполняли до превышения допустимых напряжений. По результатам построили зависимость напряже-



**Рис. 3. Результат расчета детали в генераторе форм программы Autodesk Inventor:**

а — создание прочностного расчета; б — итоговый расчет с помощью генератора форм



**Рис. 4. Зависимость напряжений, возникающих в зажиме, от оптимизации формы**

ний, возникающих в зажиме, от оптимизации формы, выражающейся в снижении массы конструкции (рис. 4).

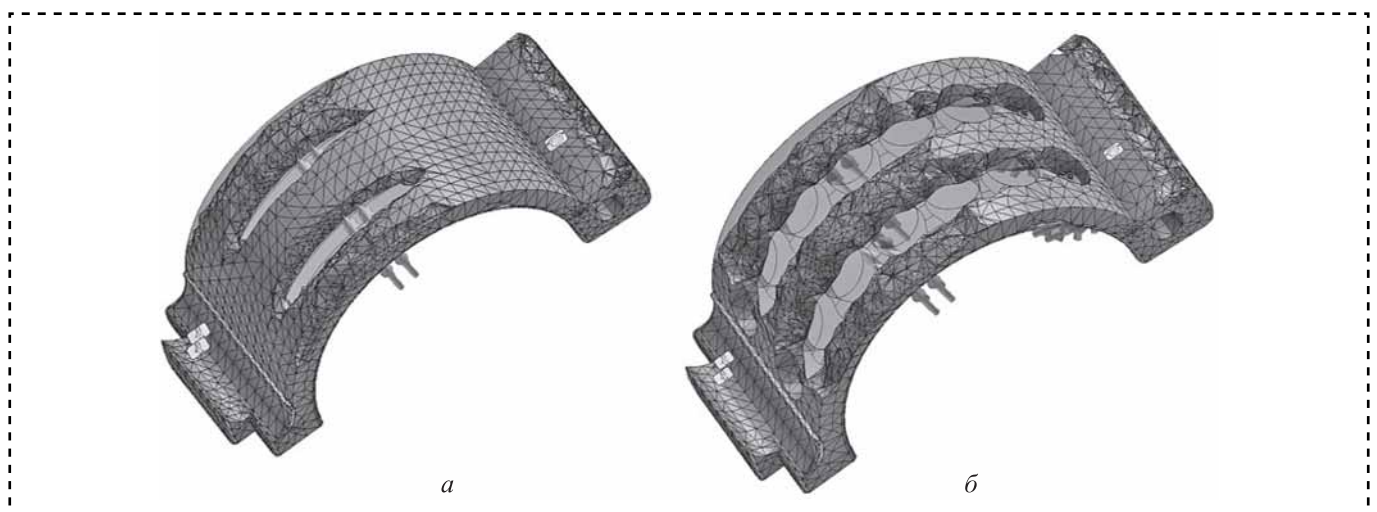
При доработке конструкции и снижении массы детали более чем на 85 % возникают напряжения, превышающие допустимое напряжение — 180 МПа, что недопустимо для выбранного материала. Конструкцию устройства доработали на основе расчетов генератора форм и с учетом возникающих максимальных напряжений в каждой детали. Расчеты позволили рационально распределить отверстия с учетом их диаметра и расположения на детали.

Снижение массы детали достигали не только изменением параметров расчета, но и добавлением отверстий и корректировкой ненагруженных участков (рис. 5).

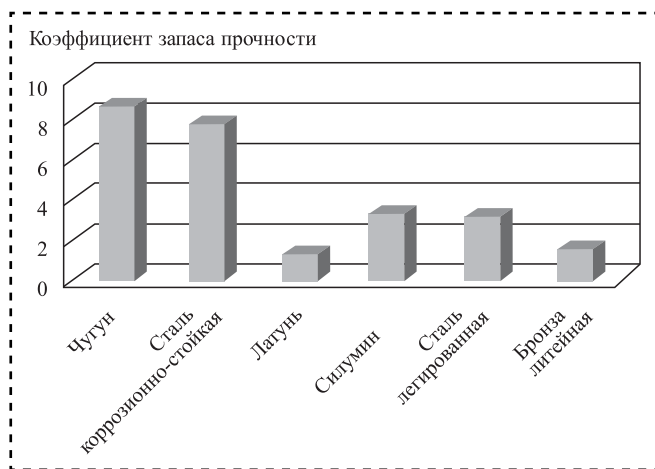
Необходимо было учесть коэффициент запаса прочности для повышения надежности работы устройства в экстремальных условиях экс-

плуатации. Использование данного зажимного устройства для устранения течи в рукавных линиях может сопровождаться воздействием различных внешних и внутренних факторов, поэтому высокие значения коэффициента запаса прочности показывают, что конструкция может выдержать прилагаемые к ней нагрузки значительно выше расчетных, что свидетельствует о надежности разработанной конструкции. На рис. 6 представлены значения коэффициента запаса прочности в зависимости от выбранного материала. Для сравнения выбрали материалы чугуна литейный, сталь коррозионно-стойкую, сталь 3, силумин АК7Ц9, сталь легированную, бронзу литейную.

Расчет коэффициента запаса прочности разрабатываемой конструкции зажима осуществляли при одинаковых условиях нагружения и формы устройства. Максимальное значение коэффициента запаса прочности принадлежит чугуну литейному. Однако использование чугуна или стали в конструкции устройства значительно повышают его массу. При проведении работ по тушению пожара каждое дополнительное (вспомогательное) устройство может замедлить действия пожарного или привести к преждевременной его усталости. При разработке подобных устройств необходимо стремиться к уменьшению массы и размера конструкции, но при этом сохраняя показатели надежности и долговечности. Поэтому выбор был сделан в пользу силумина АК7Ц9, так как по результатам расчетов он показал приемлемые значения коэффициента запаса прочности.



**Рис. 5. Промежуточные результаты расчета при снижении массы конструкции:**  
*a* — на 20 %; *б* — на 35 %



**Рис. 6. Коэффициенты запаса прочности разрабатываемой конструкции различных материалов**

На основании проведенных исследований и расчетов можно сделать вывод, что разработанная конструкция зажима обладает высокими показателями надежности, металлоемкости и долговечности, и данное устройство позволит в кратчайшие сроки восстанавливать подачу огнетушащих веществ при повреждении напорных пожарных рукавов.

#### Библиографический список

1. **Пучков П.В., Иванов В.Е.** Повышение долговечности соединительных рукавных головок напорных рукавов // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Году гражданской обороны. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. С. 186–188.

2. **Пучков П.В., Борисов Д.В.** Разработка конструкции устройства для восстановления работоспособности рукавных систем на пожаре // Предупреждение. Спасение. Помощь: сб. материалов XXVII Международной научно-практической конференции, посвященной 85-й годовщине создания гражданской обороны и 25-летию со дня образования Академии. Химки, 2017. С. 16–19.

3. **Пучков П.В., Костяев А.А.** Устройство для восстановления работоспособности рукавных систем на пожаре при поперечном разрыве напорного рукава // Современные пожаробезопасные материалы и технологии: сб. материалов Международной научно-практической конференции, посвященной Году гражданской обороны. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. С. 321–326.

4. **Пучков П.В., Суконщиков А.А.** Новые технические решения, направленные на повышение долговечности соединительных рукавных головок // Надежность и долговечность машин и механизмов: сб. материалов IX Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2018. С. 240–242.

5. **Топоров А.В., Полетаев В.А., Кропотова Н.А., Киселев В.В.** Применение сжатого газа для привода гидравлического инструмента // Сборка в машиностроении, приборостроении 2017. № 8 (205). С. 45–48.

6. **Полетаев В.А., Пучков П.В.** Повышение качества поверхностей трения деталей электронасосов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. № 9. Т. 81. С. 74–76.

7. **Иванов В.Е.** Снижение металлоемкости конструкции средствами Autodesk Inventor // Надежность и долговечность машин и механизмов: сб. материалов X Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2019. С. 427–429.





**К.М. Колмаков**, д-р хим. наук, **А.Е. Зверовщиков**, д-р техн. наук  
(Пензенский государственный университет),  
**А.Г. Схиртладзе**, д-р пед. наук (МГТУ "Станкин"),  
**А.В. Соколов**, канд. техн. наук (Пензенский государственный университет)  
E-mail: azwer@mail.ru

## Определение параметров гетерогенной среды мишени при центробежно-дуговом диспергировании твердых сплавов

*Рассмотрены баллистические параметры траектории частиц сплавов с высокой плотностью при перемещении в газовой среде, сопровождающимся фазовым переходом материала частиц. Разработана методика определения параметров мишени в зависимости от физико-механических характеристик материалов улавливаемых частиц и слоев мишени. Определена возможность сохранения сферoidalной формы частиц при электродуговом диспергировании сплавов с высокой плотностью.*

*The ballistic parameters of the trajectory of particles of high-density alloys when moving in a gas medium, accompanied by a phase transition of the material of the particles, are considered. A technique has been developed for determining the parameters of the target depending on the physical and mechanical characteristics of the materials of the captured particles and target layers. The possibility of maintaining the spheroidal shape of particles during the electric arc dispersion of high-density alloys has been determined.*

**Ключевые слова:** диспергирование, твердые сплавы, кристаллизация, баллистика, внедрение.

**Keywords:** dispersion, hard alloys, crystallization, ballistics, penetration.

Получение порошковых материалов твердого сплава с заданной формой, структурой и размерами частиц — одна из технологических задач, определяющих возможность производства качественного инструментального материала. Один из перспективных методов получения порошков с требуемыми характеристиками частиц — электродуговое диспергирование материалов. Для совершенствования технологии, в которой электродуговое плавление сочетается с распылением расплава центробежными силами, необходима разработка теоретических предпосылок динамики движения капли расплава после отрыва от электрода. Формирование структуры частицы в процессе фазового перехода является функцией динамических параметров свободного полета капли, термодинамических свойств среды. Аппаратная реализация технологии не может быть успешно выполнена без расчета основных параметров фазы полета частицы, поскольку необходимо

обеспечить необходимые скорости кристаллизации и встречи частицы расплава с мишенью.

При центробежном эрозионно-дуговом синтезе, рассматривая известную кинематику процесса и задав некоторые размеры реальной аппаратной части, начальную скорость капли можно принять в диапазоне 140...250 м/с [1].

Исследуя фазу свободного полета капли, примем следующие допущения: плотность газовой среды  $\rho_v$  вдоль траектории постоянна, влияние силы тяжести пренебрежимо мало, площадь миделя частицы на полете постоянна, коэффициент лобового сопротивления  $C_x$  зависит от скорости частицы.

Основная характеристика формы частицы, перемещающейся по баллистической траектории в газовой среде, — безразмерный параметр формы  $\Phi$  [2]:

$$\Phi = \frac{S}{V^{2/3}}, \quad (1)$$



где  $S$  — средний мидель частицы (математическое ожидание площади проекции тела на плоскость, нормальную к направлению полета);

$V$  — объем частицы (для сферы вне зависимости от размера,  $\Phi = 1,21$ ).

Уравнение движения частицы в этом случае приобретает вид:

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{\rho_B v^2}{2} S C_x, \quad (2)$$

где  $v$  — текущая скорость частицы.

Это уравнение можно представить в виде:

$$\frac{dv}{dt} = -Av^2, \quad (3)$$

где  $A$  — баллистический коэффициент,  $m^{-1}$ .

Интегрируя уравнение (3) при начальной скорости  $v_0$  и в системе координат, ноль которой находится в точке отрыва капли,  $x(0) = 0$ , получим:

$$v = \frac{v_0}{1 + Av_0 t}; \quad x = \frac{1}{A} \ln(1 + Av_0 t).$$

Наибольший интерес для проектирования аппаратной реализации процесса представляет зависимость снижения скорости частицы от пройденного расстояния  $x$ . Используя замену  $dv/dt = dv/dx$ ;  $dx/dt = v dv/dx$ , интегрируя полученное выражение с начальным условием  $v(0) = v_0$  для скорости, получим:

$$v = v_0 e^{-Ax}. \quad (4)$$

Это выражение определяет закон затухания скорости тела в баллистическом полете.

Выражение для баллистического коэффициента представим в виде

$$A = \frac{\rho_B C_x \Phi}{2 \rho_{сф}^{2/3} m^{1/3}}, \quad (5)$$

где  $\rho_{сф}$  — плотность материала частицы.

Приняв плотности воздуха и карбида вольфрама 1,29 и 15 600  $кг/м^3$  соответственно, получим зависимость  $C_x$  от скорости движения:

$$C_x = \begin{cases} 0,5 & \text{при } v \leq 05 \text{ м/с;} \\ \frac{1}{1,49 + 0,51 \sin(860^\circ - 350^\circ \lg v)} & \text{при } 550 \geq v > 150 \text{ м/с;} \\ 0,865 \left(1 + \frac{50}{v}\right) & \text{при } v > 550 \text{ м/с.} \end{cases} \quad (6)$$

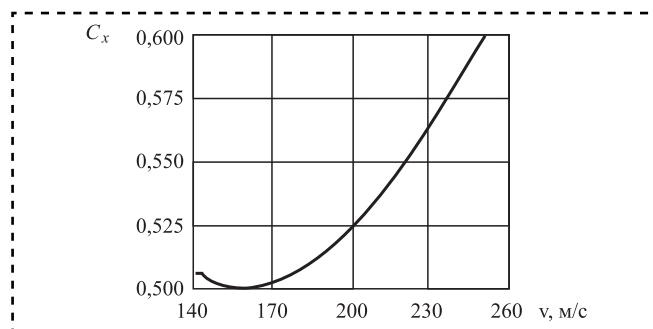


Рис. 1. Влияние начальной скорости частицы на коэффициент лобового сопротивления  $C_x$

В интервале скоростей 140...250 м/с с небольшой погрешностью примем в дальнейших расчетах  $C_x = 0,55$  (рис. 1).

Конечная скорость частицы зависит от начальной скорости схода капли, размера сфероидальной частицы  $d_{ш}$  и расстояния от точки отрыва до преграды  $x$  (рис. 2 на стр. 4 обложки, табл. 1).

Скорость встречи сфероидальной частицы с мишенью, наряду с рядом других критически действующих факторов, определяет степень деформации или разрушения частицы. Параметрами процесса встречи являются соответственно глубина  $L_\infty$  внедрения в полубесконечную преграду либо толщина  $h_{пр}$  предельно пробиваемой конечной преграды:

$$h_{пр} = yL_\infty, \quad (7)$$

где  $y$  — коэффициент, учитывающий вспомогательное действие тыльных эффектов при пробитии (коэффициент конечности преграды),  $y > 1$ .

В зависимости от скорости удара и соотношения свойств ударника и преграды, частица при внедрении может сохранять свою форму либо претерпевать разнообразные деформации [2].

Таблица 1  
Параметры частиц при удалении от диска

$v_0$ , м/с	$d_{ш}$ , мкм	Скорость частиц, м/с, при удалении от точки отрыва $x$ , м		
		0,1	0,5	1,0
250	10	140	13,6	0,74
	1	0,74	0	0
140	10	78	7,6	0,41
	1	0,41	0	0



Известны "аэродинамический", "переходный", "кратерный" механизмы внедрения.

Вид механизма определяется скоростью частицы и параметром соударяемой пары  $P$ :

$$P = \frac{\rho_y}{\rho_{\Pi}} e^{\frac{\sigma_y - \sigma_{\Pi}}{\sigma_y}}, \quad (8)$$

где  $\rho_y$ ,  $\rho_{\Pi}$  — плотности ударника и преграды соответственно;

$\sigma_y$ ,  $\sigma_{\Pi}$  — пределы текучести ударника и преграды.

Расчетные значения параметров соударяемой пары для ряда материалов преграды говорят об аэродинамическом механизме внедрения (табл. 2) [3, 5–7].

При проникновении частицы в сплошную среду ее движение описывается законом Ньютона:

$$m \frac{dv}{dt} = -F, \quad (9)$$

где  $m$  — масса ударника;

$v$  — скорость ударника;

$t$  — время;

$F$  — сила сопротивления среды.

Предположим, что  $F$  можно представить в виде суммы трех сил [3]:

$$F_{\Sigma} = F_1 + F_2 + F_3,$$

где  $F_1$  — сила динамического (инерционного) сопротивления,

$$F_1 = \frac{\rho_{\Pi} v^2}{2} S C_x;$$

Таблица 2

Параметры соударяемой пары

Параметры	WC—WC <sub>2</sub>	Al	Полиэтилен СВМПЭ	Вода
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	15 600	2700	910...970	1000
$\sigma_{сж}$ , МПа	—	420	100	1,82 (лед)
$\sigma_{\Pi}$ , МПа	3330 (5 мкм)	50...120	30	10 <sup>-6</sup>
$\eta$ , Па·с	—	1,25·10 <sup>5</sup>	43,8*	0,001
$P$	—	15,5...15,2	44,7	42,4

\* Показатели рассчитаны исходя из структуры полимера [8].

$F_2$  — сила вязкого сопротивления,  $F_2 = C_x \eta dv$  (для сферы  $F_2 = 3\pi\eta dv$ );

$\eta$  — коэффициент вязкости среды;

$F_3$  — сила статического сопротивления, характеризующая прочностью среды,

$$F_3 = C_x S \sigma_{сж},$$

где  $\sigma_{сж}$  — предел прочности среды на сжатие.

Представим уравнение (9) в следующем виде:

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{\rho_{\Pi} v^2}{2} S C_x - 3\pi d \eta v - C_x S \sigma_{сж}. \quad (10)$$

Введем постоянные:

$$A = \frac{\rho_{\Pi} S C_x}{2m}; \quad B = \frac{3\pi d \eta}{m}; \quad C = \frac{C_x S \sigma_{сж}}{m}$$

и проведем замену  $dv/dt = v dv/dx$ , тогда:

$$\frac{v dv}{dx} = -Av^2 - Bv - C.$$

При  $x = 0$ ,  $v = v_B$ ;  $x = L_{\text{пр}}$ ,  $v = 0$  ( $v_B$  — скорость встречи шарика с преградой), меняя пределы интегрирования, получаем

$$L_{\text{пр}} = \frac{\ln[v(Av + B) + C] - \frac{2B \arctg\left(\frac{2Av + B}{\sqrt{4AC - B^2}}\right)}{\sqrt{4AC - B^2}}}{2A}.$$

Подставляя значения скорости встречи в интервале от  $v_B$  до 0, получим конечное уравнение для расчета глубины преграды:

$$L_{\text{пр}} = \frac{\ln[v_B(Av_B + B) + C] - \frac{2B \arctg\left(\frac{2Av_B + B}{\sqrt{4AC - B^2}}\right)}{\sqrt{4AC - B^2}}}{2A} - \frac{\ln(C) - \frac{2B \arctg\left(\frac{B}{\sqrt{4AC - B^2}}\right)}{\sqrt{4AC - B^2}}}{2A}. \quad (11)$$

С учетом сфероидальной формы частицы и характеристик материала WC—WC<sub>2</sub> ( $\rho = 15 600$  кг/м<sup>3</sup>) постоянные уравнения проникания в материал мишени приобретают вид:

$$A = \frac{3\rho_n C_x}{4\rho d}; \quad B = \frac{18\eta}{\rho d^2}; \quad C = \frac{3C_x \sigma_{сж}}{4\rho d}.$$

Результаты расчетов по уравнению (11) для скорости встречи сферической частицы с преградой  $v_v$  в интервале ее скоростей 10...140 м/с и диаметров  $d_{ш} = 1...15$  мкм для сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и воды представлены на рис. 3 на стр. 4 обложки.

Таким образом, расчет для СВМПЭ при  $v_v = 140$  м/с и  $d = 10$  мкм дает глубину внедрения в преграду  $L_{пр} = 0,617$  мкм, для воды —  $L_{пр} = 27$  мм.

Таким образом, в качестве мишени (ловушки) при диспергировании тяжелых и твердых сплавов, исходя из условия отсутствия деформации частицы твердосплавного материала, может быть использована широкая гамма твердых и жидких сред с характеристиками, обеспечивающими требуемую скорость кристаллизации частиц. Приведенная методика позволяет определить конструктивные параметры мишени промышленных и экспериментальных установок, обеспечивающие сохранение требуемой формы частиц. Физико-механические характеристики материалов мишени также могут

быть подобраны с использованием приведенной методики. Требуемые толщины слоев мишени, как показали расчеты, технологически и конструктивно надежно обеспечиваются на сегодняшнем уровне развития машиностроительного производства.

#### Библиографический список

1. Зверовщиков А.Е., Дадущкин И.Е., Беспятов В.Н. Оценка кинематики технологического процесса электродуговой сфероидизации металлических порошков // Техника и технология современных производств. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2019. С. 78–82.
2. Физика взрыва. В 2 т. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 656 с.
3. Таблицы физических величин: справочник / под ред. акад. И.К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1009 с.
4. ГОСТ 10007–80. Фторопласт-4. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2008.
5. ТУ 6-05-18-96–80 Полиэтилен высокомолекулярный низкого давления и композиции на его основе.
6. Ли Лян, Шхинек К.Н. Воздействие льда на откосные сооружения // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 1. С. 71–79.
7. Акапашев Р.А., Павлов В.В. Предел прочности и модуль сдвига воды при малых скоростях течения // Известия Уральского государственного горного университета. 2007. № 22. С. 15–18.
8. Якубовский Е.Г. Определение вязкости твердого тела и жидкости [Электронный ресурс]. URL: [http://www.russika.ru/userfiles/390\\_1440699044.pdf](http://www.russika.ru/userfiles/390_1440699044.pdf).



## ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



# СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

*Под общей редакцией А.Г. Сулова*

2019 г. 800 с.

**Цена 9500 руб.**

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

**ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ**  
по e-mail: [realiz@mashin.ru](mailto:realiz@mashin.ru)  
Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте [WWW.MASHIN.RU](http://WWW.MASHIN.RU)



**С.А. Поляков, Л.И. Куксенова**, д-ра техн. наук  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Институт машиноведения РАН им. А.А. Благодирова),  
**Е.М. Кулешова** (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
E-mail: kuleshova.em@mail.ru

## Оценка показателей динамичности и вероятности заедания тяжело нагруженных сопряжений скольжения с различными смазочными материалами

*Предложена методика оценки вероятности заедания сопряжений скольжения на основе сопоставления статистических распределений показателей допустимой нагруженности в эксплуатации и в лабораторных условиях. Рассмотрено приложение данного метода для сравнительной оценки значений допустимой нагруженности червячных передач в связи с выбором вида смазочного материала.*

*A method for estimating the probability of jamming of sliding pairings based on a comparison of statistical distributions of permissible load indicators in operation and in laboratory conditions is proposed. The application of this method for comparative evaluation of the permissible load values of worm gears in connection with the choice of the type of lubricant is considered.*

**Ключевые слова:** заедание, сопряжение скольжения, смазочные материалы.

**Keywords:** jamming, sliding pairings, lubricants.

### Введение

При трении скольжения потеря работоспособности многих узлов обусловлена заеданием. Основная причина заедания — пластическая деформация приповерхностных слоев [1]. Основным параметром внешнего воздействия на сопряжение, вызывающий заедание, — нагрузка, которая существенно зависит от показателей динамичности сопряжения. Механизм пластической деформации при трении особенно актуален для гетерогенных материалов, содержащих мягкую структурную составляющую, таких, например, как оловянистые бронзы, используемые как для подшипников скольжения (ПС), так и для червячных передач (ЧП) [2, 3]. При этом одним из важнейших средств защиты сопряжений скольжения от износа и заедания являются смазочные материалы (СМ), среди которых следует особо выделить, как наиболее эффективные, пленкообразующие СМ [4]. Данное направление, в особенности применительно к таким сопряжениям, как ЧП, на сегодняшний день мало разработано, и в современной технической литературе имеются, к сожалению, единичные примеры исследований в этой области [5, 6].

### Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Наиболее разработанным сопряжением в плане оценки возможности заедания являются ПС. Методические основы для оценки вероятности заедания ПС заложены, например, в работе [7]. Для подобной оценки в условиях смешанной смазки и предельных нагрузок разработан подход, позволяющий оценить вероятность заедания на основе статистических распределений показателей работоспособности, рассмотренных в ГОСТ 23.224—86. В числе этих показателей:

- нагрузка  $P_0$  или давление в подшипнике, соответствующее минимуму коэффициента трения  $f$  и, соответственно, критическому значению параметра Зоммерфельда  $Z_a$ ;
- температура масла, также соответствующая минимуму коэффициента трения  $f - T_{\text{МК}}$ ;
- в качестве интегрального показателя — само критическое значение параметра Зоммерфельда  $Z_a$ , соответствующее данным параметрическим координатам —  $P_0$  и  $T_{\text{МК}}$ .

Сопоставление среднего значения критерия Зоммерфельда, полученного в лабораторных

условиях в точке так называемого второго минимума, и среднего значения этого критерия в наиболее тяжелом режиме эксплуатации позволило получить значения вероятности отказа по причине заедания по формуле [5]:

$$P = \Phi[q(Z_a)],$$

где  $q$  — плотность вероятности;  
 $Z_a$  — критерий Зоммерфельда.

В том случае, если плотность вероятности имеет нормальное распределение, то значение нижнего предела интеграла, с помощью которого определяется вероятность отказа  $t$ , вычисляем по формуле:

$$t = (Z_3 - Z_1) / \sqrt{s_3^2 - s_1^2}, \quad (1)$$

где  $Z_3$  — минимальное среднее значение критерия Зоммерфельда в эксплуатации;

$Z_1$  — среднее значение критерия Зоммерфельда при лабораторных испытаниях, соответствующее "второму" минимуму коэффициента трения;

$s_3, s_1$  — среднеквадратические отклонения  $Z$  в эксплуатации и в лаборатории соответственно.

В результате обработки данных лабораторных испытаний и данных эксплуатации получены значения, отраженные в таблице.

Расчет вероятности отказа дает значения, близкие к эксплуатационной статистике, причем с ростом нагруженности сопряжения точность расчета возрастает (рис. 1).

На основе приведенных данных можно сделать ряд важных выводов. Во-первых, исследование показателей работоспособности и соответственно динамической адаптации трибосопряжений по методике ГОСТ 23.224—86 позволяет определить параметрические границы их работоспособности для данных сочетаний материалов, определяемых как пределы их динамической адаптации. Данный вывод важен в отношении разработки и испытаний новых материалов, в том числе, смазочных композиций. Во-вторых, использование данных о параме-

Данные по задирам шатунных шеек коленчатых валов 3МЗ-53

Параметр	Коэффициент перегрузки			
	1	1,05	1,1	1,2
Число отказов в эксплуатации, %	3,8	4,4	7,56	9,12
Расчет числа отказов, %	5,3	6,5	7,5	9,5

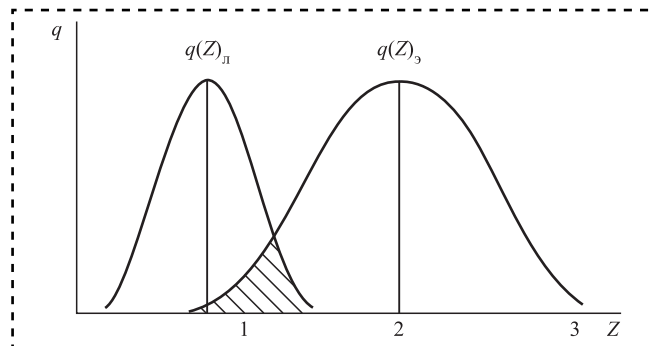


Рис. 1. Распределение плотности вероятности заедания  $q$  для различных значений параметра Зоммерфельда (дан в условных единицах для лабораторных  $q(Z_1)$  и  $q(Z_3)$  эксплуатационных условий):

заштрихованная область — диапазон вероятного отказа

трических границ работоспособности трибосопряжения позволяет с определенной вероятностью прогнозировать возникновение отказа в эксплуатации по причине заедания.

Однако недостатком данного подхода является статичность предлагаемой оценки, поскольку используемые выше формулы не учитывают временных показателей. Кроме того, лабораторные показатели материала могут изменяться в связи с уровнем изношенности деталей или в связи с использованием других смазочных материалов [5, 6, 8]. Поэтому процесс динамической адаптации сопряжения в разных условиях будет протекать по-разному. Для этого необходимо уточнить критические значения допустимой динамичности работы сопряжения в эксплуатации и сопоставить их с адаптационными возможностями сопряжения.

**Цель работы** — приложение метода оценки вероятности заедания к проблеме выбора СМ для тяжело нагруженных сопряжений скольжения с учетом показателей динамичности их работы.

Для сравнительной оценки значений допустимой нагруженности тяжело нагруженных сопряжений скольжения, в частности, ЧП в связи с выбором вида СМ необходимо ввести понятие показателя динамичности.

Традиционно для оценки динамичности приводов используют понятие коэффициента динамичности [6]:

$$K_d = 1 + \Delta T / T_n = 1 + (C_f / T_n) \sum A_i, \quad (2)$$

где  $T_n$  — номинальный момент;

$\Delta T$  — превышение номинального момента;





$C_f$  — коэффициент крутильной жесткости ЧП;

$A_f$  — амплитуды крутильных колебаний ЧП.

Традиционное понимание данной величины состоит в том, что приращение вращающего момента  $\Delta T$  возникает в результате изменения внешней нагрузки. Однако подобная перегрузка должна рассматриваться как случайное кратковременное отклонение, а номинальный момент должен выбираться как максимально допустимый длительно действующий.

Тем не менее вариации момента могут возникать в силу изменений внутренней динамики привода. Для ПС эти изменения могут возникать из-за нарушения условий гидродинамики, например, при работе в режиме "пуск—остановка". Возникающая в таких условиях система смешанной смазки будет приводить к изнашиванию и постепенному ухудшению условий контактирования.

Однако существуют сопряжения скольжения, которые работают в еще более тяжелых условиях, в частности, червячное зацепление. Контактные напряжения здесь могут достигать сотен мегапаскалей, при этом эволюция показателей динамичности происходит в силу изнашивания и роста зазора в зацеплении, а также ухудшения условий трения и смазывания и, как следствие, роста силы трения в зацеплении [8—10].

Основная причина внутренней динамичности ЧП — контактные процессы в зацеплении, которые могут вызвать процесс автоколебаний [9, 10]. В связи с этим наибольший интерес представляет поведение вращающего момента на быстроходном валу, который играет роль сил трения по отношению к тормозному моменту, играющему роль нормальной нагрузки.

С учетом того, что сила трения является проекцией окружной силы на червяке на контактную поверхность, выражение для коэффициента трения в зацеплении имеет вид

$$f = \left( \frac{T_{\text{эд}} d_2}{T_{\text{тор}} d_1} \right) (\cos \gamma)^2 \cos \alpha, \quad (3)$$

где  $d_1$  — делительный диаметр червяка;

$d_2$  — делительный диаметр колеса;

$\gamma$  — угол наклона винтовой линии червяка;

$\alpha$  — половина угла при вершине витка червяка;

$T_{\text{эд}}$  — момент на быстроходном валу,

$$T_{\text{эд}} = \frac{F_{\text{ок1}} d_1}{2};$$

$T_{\text{тор}}$  — тормозной (нагружающий) момент,  
 $T_{\text{тор}} = \frac{F_{\text{ок2}} d_2}{2};$

$F_{\text{ок1}}, F_{\text{ок2}}$  — окружная сила на червяке и колесе соответственно.

Формула (3) является прямым аналогом закона Амонтона—Кулона для наклонной плоскости, где роль силы трения играет  $F_{\text{ок1}}$ , а роль нормальной силы —  $F_{\text{ок2}}$ . Поскольку углы  $\gamma$  и  $\alpha$  в процессе работы не меняются, а значение  $F_{\text{ок2}}$  определяется тормозным моментом (в рассматриваемом случае он постоянен), то колебания окружной силы на червяке можно объяснить только колебаниями коэффициента трения  $f$  в контакте червяка и колеса [9]. Таким образом, динамика вращающего момента на быстроходном валу ЧП будет существенно зависеть от силы трения в контакте, т.е. от внутренней динамичности передачи.

Показатель динамичности для быстроходного вала ЧП можно ввести в виде коэффициента прироста динамичности быстроходного вала [9]:

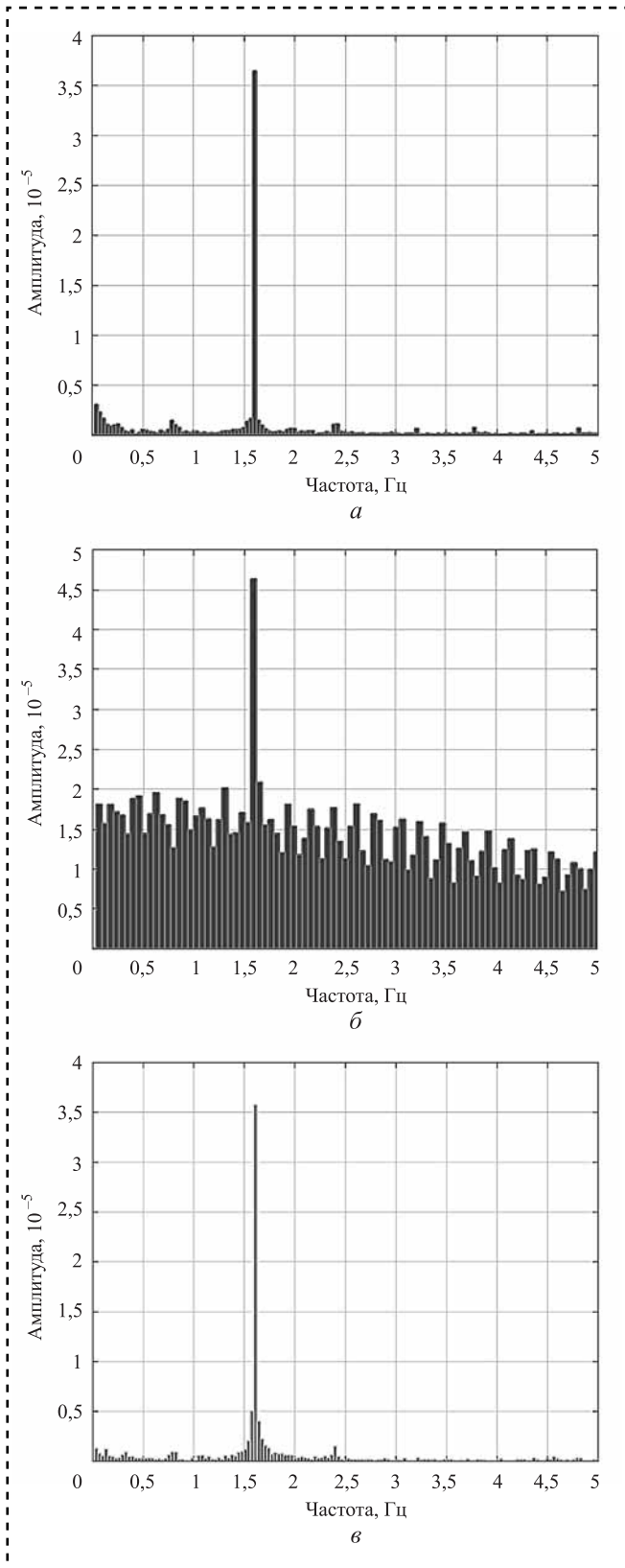
$$K_{\text{дбв}} = 1 + \Delta T_{\text{эд}}, \quad (4)$$

где  $\Delta T_{\text{эд}}$  — абсолютное значение прироста момента  $T_{\text{эд}}$  в процессе колебаний, которое формируется преимущественно за счет автоколебаний, соотношенное с  $T_{\text{тор}}$  — текущим значением тормозного (нагружающего) момента на достигнутой ступени нагружения.

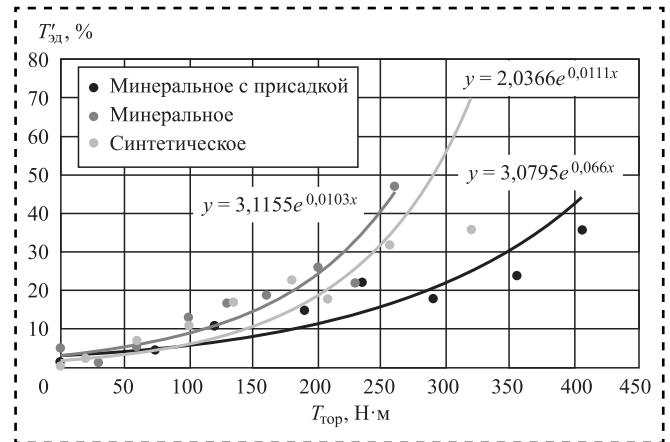
Формула (4) является обобщением выражения (2) на случай изменяющегося значения тормозного момента и показывает, как амплитуда колебаний может изменяться в связи с ростом тормозного момента, в том числе, в случае превышения номинального момента. Автоколебания возникают и могут увеличиваться в связи с увеличением силы трения в контакте ЧП, обусловленным ростом тормозного момента. Для анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) удобно использовать метод быстрого преобразования Фурье, который позволяет построить распределение амплитуд колебаний моментов в зависимости от значений соответствующих частот, что дает возможность выявить доминирующую частоту [9].

Вид распределения амплитуды колебаний быстроходного вала ЧП в зависимости от частоты при использовании разных СМ показан на рис. 2.

Обработанные методом быстрых преобразований Фурье данные по изменениям отно-



**Рис. 2. Изменения относительной амплитуды колебаний момента на быстроходном валу для основных частот в процессе испытаний при использовании:**  
*a* — синтетического масла; *б* — минерального масла; *в* — минерального масла с добавкой "Стрибойл"



**Рис. 3. Анализ зависимости амплитуды колебаний момента на быстроходном валу для доминирующей частоты от тормозного момента при использовании разных масел:**

$T'_{эд} = \frac{I_{\max}}{T_{эд}} 100 \%$ , где  $T_{\max}$  — максимальное значение размаха колебания момента на доминирующей частоте

сительной амплитуды колебаний момента на быстроходном валу для основных частот  $\Delta T'_{эд}$  в процессе испытаний дают возможность выявить доминирующую частоту колебаний, на которую приходится основной объем мощности, расходуемой при колебаниях (рис. 3). Эта частота соответствует частоте автоколебаний, которая определяется характером контактного взаимодействия в зацеплении [9]. Кроме того, использование значения относительной амплитуды  $\Delta T'_{эд}$ , определяющей значение коэффициента динамичности быстроходного вала по формуле (4), позволяет не только оценить динамичность ЧП с разными СМ, но и ранжировать эти материалы по их противозадирному действию в зависимости от нагружающего момента, задав предельное значение коэффициента динамичности.

По мере повышения антифрикционных свойств СМ амплитуда  $T'_{эд}$  уменьшается в силу закона Амонтона—Кулона, который представлен в виде уравнения (3), что также согласуется с диаграммой Герси—Штрибека. Главное достижение здесь — снижение коэффициента динамичности быстроходного вала ЧП, что, в свою очередь, снижает вероятность заедания и увеличивает ресурс по критерию заедания.

Для введения количественных оценок предложен комплексный показатель, который отражает как вероятность заедания сопряжения, так и его грузоподъемность по критерию заедания. Вероятность заедания ЧП существенно возрастает при достижении коэффициентом динамичности значений более 1,4 [8]. Это согласуется



с данными таблицы, из которой следует, что повышение коэффициента перегрузки, который в данном контексте эквивалентен коэффициенту динамичности, более чем в 1,2, раза ведет к повышению вероятности заедания более чем на 10 %. В то же время при отсутствии динамических составляющих внешней нагрузки рост динамичности передачи имеет внутренние причины, в рассматриваемом случае — рост силы трения в контакте и генерацию автоколебаний. Примем эквивалентность внешнего коэффициента динамичности  $K_d$  по формуле (2) и внутреннего коэффициента динамичности  $K_{дбв}$  по формуле (4). Тогда в качестве характеристики грузоподъемности и одновременно показателя задиристости можно принять такое значение тормозного (нагружающего) момента, при котором коэффициент  $K_{дбв} \geq 1,4$ . Это соответствует приросту значений амплитуд колебаний до 40 % и более (см. рис. 3). Тогда из графика на рис. 3 получим следующий ряд значений: для минерального масла — 240 Н·м, для синтетического масла — 300 Н·м, для минерального масла с добавкой "Стрибойл" — 400 Н·м.

Предложен новый показатель грузоподъемности ЧП — значение нагружающего момента, при достижении которого коэффициент динамичности быстроходного вала достигает значений более 1,4. Исходя из этого показателя при замене масла максимально допустимый нагружающий момент возрастает более чем в полтора раза, что подтверждают данные работ [7, 9] о существенном влиянии СМ на несущую способность сопряжений скольжения. Для рассматриваемого редуктора Ч-80 номинальный момент при смазывании штатным маслом составил 260 Н·м.

### Заключение

Исследование динамической адаптации трибосопряжений по методике ГОСТ 23.224—86 позволяет определить параметрические границы их работоспособности для данных сочетаний конструкционных и смазочных материалов, определяемые как пределы допустимой нагрузки при прочих равных условиях, что для ЧП означает предельно допустимый нагружающий (тормозной) момент.

Использование данных о параметрических границах работоспособности трибосопряжения позволяет с вероятностью от 10 % и более прогнозировать возникновение отказа в эксплуатации по причине заедания.

Разработана методика оценки параметрических границ работоспособности ЧП по критерию заедания посредством выявления измененной амплитуды колебаний вращающегося момента на быстроходном валу ЧП  $T_{эд}$  в зависимости от роста нагружающего (тормозного) момента.

Показано, что по мере повышения антифрикционных свойств СМ амплитуда колебаний  $T_{эд}$  уменьшается, что ведет к росту несущей способности тяжело нагруженного сопряжения скольжения — области зацепления ЧП, что позволяет расширить параметрические границы его работоспособности.

### Библиографический список

1. **Severe** plastic deformation of four FCC metals during friction under lubricated conditions / Moshkovich A., Lapsker I. et al. // *Wear*. 2017. Vol. 386—387. P. 49—57.
2. **Moshkovich A., Perfileyev V., Rapoport L.** Effect of plastic deformation and damage development during friction of FCC metals in the conditions of boundary lubrication // *Lubricants*. 2019. Vol. 7. Iss. 5. P. 45.
3. **Friction**, wear and plastic deformation of Cu and  $\alpha/\beta$  brass under lubrication conditions / A. Moshkovich, V. Perfileyev et al. // *Wear*. 2014. Vol. 320. P. 34—40.
4. **Anchored** graphene nanosheet films towards high performance solid lubricants / Y.J. Mai et al. // *Materials & Design*. 2018. Vol. 160. P. 861—869.
5. **Investigation** of the lubricated wear behavior of ductile cast iron and quenched and tempered alloy steel for possible use in worm gearing / V. Fontanari, M. Benedetti et al. // *Wear*. 2016. Vol. 350—351. P. 68—73.
6. **Improving** worm-gear performance by optimal lubricant selection in accelerated tests / M.N. Zakharov et al. // *Russian Engineering Research*. 2015. Vol. 35. Iss. 4. P. 253—255 (DOI: 10.3103/S1068798X15040206).
7. **Поляков С.А., Бурумкулов Ф.Х., Куксенова Л.И.** Оценка работоспособности трибосистем на основе экстремальных показателей их динамической адаптации // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2009. № 10. С. 12—17.
8. **Андрienko Л.А., Вязников В.А.** Влияние изнашивания на динамические нагрузки в червячной передаче // *Известия вузов. Машиностроение*. 2011. № 9. С. 18—22.
9. **Поляков С.А., Гончаров С.Ю., Куксенова Л.И.** Разработка метода оценки работоспособности червячных передач на основе анализа их триботехнических показателей // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2016. № 5. С. 81—87.
10. **Nuzhdin K., Musalimov V.** The experimental determination of bifurcation components of friction // *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 199. P. 1478—1483.
11. **Livshits L.S., Pichougin D.V.** Tribo-metal-organic films on the friction surfaces of the couple aluminium alloy — steel, reducing friction and wear // *IV European Tribology Congress "Eurotrib 85"*. Elsevier, 1985. Vol. IV. P. 400.



**И.П. Попов**, канд. техн. наук  
(Курганский государственный университет)  
E-mail: ip.popov@yandex.ru

## Символическое представление вынужденных колебаний разветвленных механических систем

*Рассмотрено значительное упрощение вычислений путем замены необходимости решения дифференциальных уравнений на более простые алгебраические методы. Используется комплексное представление гармонических и связанных с ними величин. Изучены параллельно-последовательное и последовательно-параллельное соединения потребителей механической мощности.*

*Considered a significantly simplify calculations by replacing the need to solve differential equations with simpler algebraic methods. A comprehensive representation of harmonic and related quantities is used. Parallel-series and series-parallel connections of mechanical power consumers have been studied.*

**Ключевые слова:** потребители механической мощности, вынужденные колебания, параллельное соединение, последовательное соединение, резонанс сил, резонанс скоростей.

**Keywords:** consumers of mechanical power, forced vibrations, parallel connection, series connection, resonance of forces, resonance of speeds.

### Введение

**Цель работы** — значительное упрощение вычислений путем замены необходимости решения дифференциальных уравнений на алгебраические методы.

Ранее определены следующие величины.

Инертный и упругий реактансы в комплексном изображении —  $\underline{x}_m = \omega m e^{i\frac{\pi}{2}} = i\omega m$ ;  
 $\underline{x}_k = -\frac{k}{\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}} = \frac{k}{\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i\frac{k}{\omega}$ .

Резистанс в комплексном изображении —  $\underline{r} = r$ .

Импеданс в комплексном изображении —  $\underline{z} = r + \underline{x} = r + \left(m\omega - \frac{k}{\omega}\right) e^{i\frac{\pi}{2}}$ .

Инертный и упругий сассептансы в комплексном изображении —  $\underline{b}_m = \frac{1}{\omega m} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i\frac{1}{\omega m} = \frac{1}{\underline{x}_m}$ ;  $\underline{b}_k = \frac{\omega}{k} e^{i\frac{\pi}{2}} = i\frac{\omega}{k} = \frac{1}{\underline{x}_k}$ .

Кондактанс в комплексном изображении —  $\underline{g} = g = \frac{1}{r}$ .

Адмитанс в комплексном изображении —

$$\underline{y} = \underline{g} + \underline{b} = g + \left(\frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m}\right) e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

Очевидны выражения

$$\underline{F} = \underline{z}\dot{v} = Zv e^{i\varphi}, \quad (1)$$

$$\dot{v} = \underline{y}\underline{F} = Y e^{i\varphi} F e^{i\frac{\pi}{2}} = Y F e^{i\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right)}. \quad (2)$$

Задачи исследования состоят в разработке алгоритмов расчетов разветвленных механических систем [1, 2].

Актуальность работы обусловлена тем, что механические колебания широко распространены в разнообразных технологических процессах [3—9].

Используем комплексное представление гармонических и связанных с ними величин. Подобный подход широко применяют в электротехнике.

### Связь между механическими величинами

*Теорема 1.* Имеет место выражение:

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}}.$$



*Доказательство.* С учетом выражения (1)

$$\underline{z} = \frac{\dot{F}}{\dot{v}};$$

воспользуемся формулой (2):

$$\underline{y} = \frac{\dot{v}}{\dot{F}} = \frac{1}{\underline{z}}.$$

Теорема доказана.

*Следствие.* При  $r = 0$   $\underline{b} = 1/\underline{x}$ , так как при этом  $\underline{y} = \underline{b}$ ,  $\underline{z} = \underline{x}$ .

*Теорема 2.* Для обратных эквивалентных величин имеют место выражения:

$$g^* = \frac{r}{r^2 + x^2}; \quad \underline{b}^* = \frac{x}{r^2 + x^2} e^{-i\frac{\pi}{2}};$$

$$r^* = \frac{g}{g^2 + b^2}; \quad \underline{x}^* = \frac{b}{g^2 + b^2} e^{-i\frac{\pi}{2}}.$$

*Доказательство:*

$$\underline{z} = r + \underline{x} = r + ix;$$

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}} = \frac{1}{r + ix} \frac{r - ix}{r - ix} = \frac{r - ix}{r^2 + x^2} =$$

$$= \frac{r}{r^2 + x^2} - i \frac{x}{r^2 + x^2} = g^* + \underline{b}^*;$$

$$\underline{y} = g + \underline{b} = g + ib;$$

$$\underline{z} = \frac{1}{\underline{y}} = \frac{1}{g + ib} \frac{g - ib}{g - ib} = \frac{g - ib}{g^2 + b^2} =$$

$$= \frac{g}{g^2 + b^2} - i \frac{b}{g^2 + b^2} = r^* + \underline{x}^*.$$

Теорема доказана.

*Теорема 3.* Для схемы последовательного соединения механических систем имеет место выражение:  $\underline{y} = \sum_{j=1}^n \underline{y}_j$ .

*Доказательство.* На все составляющие механические системы воздействует одна сила  $\dot{F}$ . Для любой из механических систем с учетом формулы (2) можно записать:

$$\dot{v}_j = \underline{y}_j \dot{F}.$$

В соответствии с принципом суперпозиции

$$\dot{v} = \sum_{j=1}^n \dot{v}_j = \sum_{j=1}^n \underline{y}_j \dot{F} = \dot{F} \sum_{j=1}^n \underline{y}_j = \dot{F} \underline{y}.$$

Теорема доказана.

*Следствие 1:*

$$\frac{1}{\underline{z}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\underline{z}_j}.$$

*Следствие 2:*

$$\underline{z} = \frac{\prod_{j=1}^n \underline{z}_j}{\sum_{k=1}^n \prod_{j=1, j \neq k}^n \underline{z}_j}.$$

*Следствие 3.* Импеданс любой из составляющих механических систем больше эквивалентного импеданса.

*Следствие 4.* Если  $\underline{z}_1 = \underline{z}_2 = \dots = \underline{z}_j = \dots = \underline{z}_n = \underline{z}^*$ , то

$$\underline{z} = \frac{\underline{z}^*}{n}.$$

*Следствие 5:*

$$\lim_{\underline{z}_1 \rightarrow \infty} \underline{z} = \frac{\prod_{j=2}^n \underline{z}_j}{\sum_{k=2}^n \prod_{j=2, j \neq k}^n \underline{z}_j}.$$

*Теорема 4.* Для схемы параллельного соединения механических систем имеет место выражение:  $\underline{z} = \sum_{j=1}^n \underline{z}_j$ .

*Доказательство.* Все составляющие механические системы имеют одну скорость  $\dot{v}$ . Для любой из составляющих механических систем с учетом выражения (1) можно записать

$$\dot{F}_j = \underline{z}_j \dot{v}.$$

В соответствии с принципом суперпозиции

$$\dot{F} = \sum_{j=1}^n \dot{F}_j = \sum_{j=1}^n \underline{z}_j \dot{v} = \dot{v} \sum_{j=1}^n \underline{z}_j = \dot{v} \underline{z}.$$

Теорема доказана.

*Следствие 1:*

$$\frac{1}{\underline{y}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\underline{y}_j}.$$

*Следствие 2:*

$$\underline{y} = \frac{\prod_{j=1}^n \underline{y}_j}{\sum_{k=1}^n \prod_{j=1, j \neq k}^n \underline{y}_j}.$$



**Следствие 3.** Адмитанс любой из составляющих механических систем больше эквивалентного адмитанса.

**Следствие 4.** Если  $\underline{y}_1 = \underline{y}_2 = \dots = \underline{y}_j = \dots = \underline{y}_n = \underline{y}^*$ , то

$$\underline{y} = \frac{\underline{y}^*}{n}.$$

**Следствие 5:**  $\lim_{y_1 \rightarrow \infty} \underline{y} = \frac{\prod_{j=2}^n \underline{y}_j}{\sum_{k=2}^n \prod_{j=2, j \neq k}^n \underline{y}_j}$ .

**Схема параллельно-последовательного соединения (рис. 1)**

С учетом теоремы 1:  $\underline{z}_2 = 1/\underline{y}_2$ .

С учетом теоремы 4:  $\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2$ .

С учетом выражения (1):  $\dot{v} = \dot{F}/\underline{z}$ .

**Пример 1.** Исходные данные:  $\dot{F} = 100e^{i0}$  Н,  $\omega = 2$  рад/с,  $m = 10$  кг,  $k = 20$  кг·с<sup>-2</sup>,  $r = 7$  кг·с<sup>-1</sup>. Определить все остальные параметры:

$$\underline{z}_2 = 1/\underline{y}_2 = 1/(15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ}) \approx 6,607 e^{-i19,29^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 = 12,207 e^{i55^\circ} + 6,607 e^{-i19,29^\circ} = 15,372 e^{i30,57^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{v} = \dot{F}/\underline{z} = 100/(15,372 e^{i30,57^\circ}) = 6,505 e^{-i30,57^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{F}_{m1} = \underline{x}_{m1} \dot{v} = 20 e^{i90^\circ} \cdot 6,505 e^{-i30,57^\circ} = 130,1 e^{i59,43^\circ} \text{ Н};$$

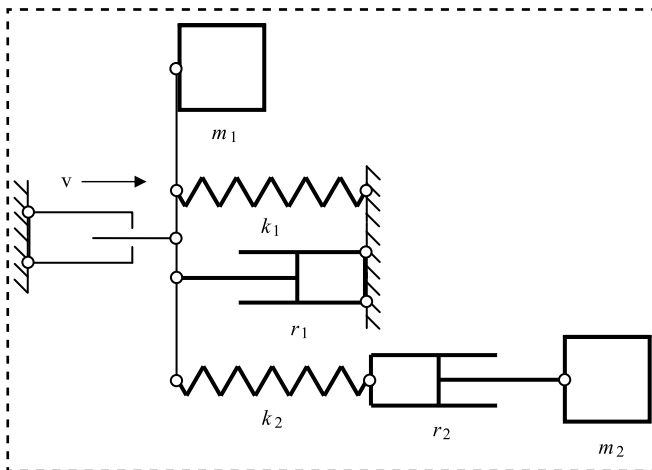


Рис. 1. Схема параллельно-последовательного соединения

$$\dot{F}_{k1} = \underline{x}_{k1} \dot{v} = 10 e^{-i90^\circ} \cdot 6,505 e^{-i30,57^\circ} = 65,05 e^{-i120,57^\circ} \text{ Н};$$

$$\dot{F}_{r1} = r_1 \dot{v} = 7 e^{i0} \cdot 6,505 e^{-i30,57^\circ} = 45,535 e^{-i30,57^\circ} \text{ Н};$$

$$\dot{F}_2 = \underline{z}_2 \dot{v} = 6,607 e^{-i19,29^\circ} \cdot 6,505 e^{-i30,57^\circ} = 42,979 e^{-i49,86^\circ} \text{ Н};$$

$$\dot{v}_{m2} = \underline{b}_{m2} \dot{F}_2 = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 42,979 e^{-i49,86^\circ} = 2,149 e^{-i139,86^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{v}_{k2} = \underline{b}_{k2} \dot{F}_2 = 10 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 42,979 e^{-i49,86^\circ} = 4,298 e^{i40,14^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$\dot{v}_{r2} = g_2 \dot{F}_2 = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 42,979 e^{-i49,86^\circ} = 6,14 e^{-i49,86^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}.$$

Расчет с применением дифференциальных уравнений занял бы несколько страниц.

Данным примера 1 соответствует векторная диаграмма на рис. 2.

**Пример 2.** Для параллельно-последовательного (двойного) резонанса [10]. Отличие от примера 1 состоит в том, что  $k = 40$  кг·с<sup>-2</sup>.

$$\underline{z}_1 = \underline{z}_2 = r = 7 e^{i0^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

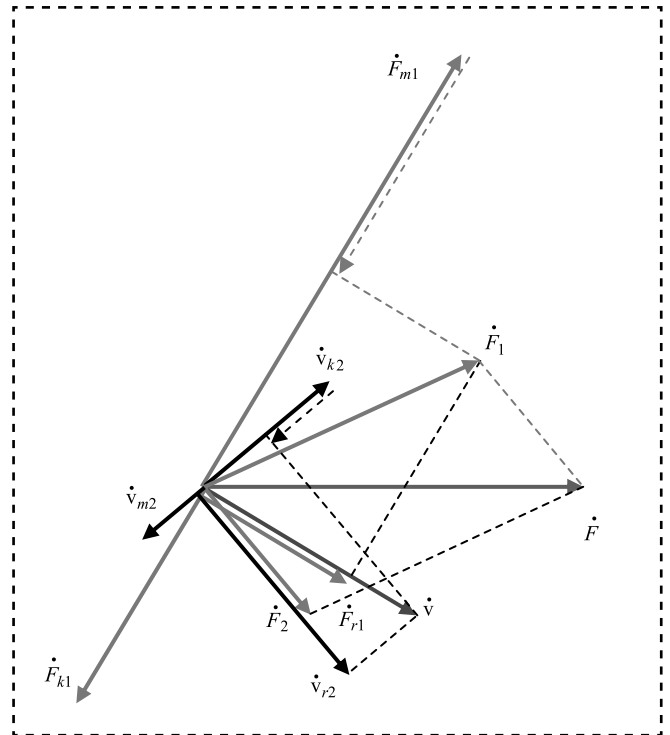


Рис. 2. Параллельно-последовательное соединение



$$\begin{aligned} \underline{z} &= \underline{z}_1 + \underline{z}_2 = 2r = 14e^{i0^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{v} &= \dot{F}/\underline{z} = 100/(14e^{i0^\circ}) = 7,143e^{i0^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{F}_{m1} &= \underline{x}_{m1}\dot{v} = 20e^{i90^\circ} \cdot 7,143e^{i0^\circ} = 142,857e^{i90^\circ} \text{ Н}; \\ \dot{F}_{k1} &= \underline{x}_{k1}\dot{v} = 20e^{-i90^\circ} \cdot 7,143e^{i0^\circ} = 142,857e^{-i90^\circ} \text{ Н}; \\ \dot{F}_{r1} &= \dot{F}_1 = r_1\dot{v} = 7e^{i0} \cdot 7,143e^{i0^\circ} = 50e^{i0^\circ} \text{ Н}; \\ \dot{F}_2 &= \underline{z}_2\dot{v} = 7e^{i0^\circ} \cdot 7,143e^{i0^\circ} = 50e^{i0^\circ} \text{ Н}; \\ \dot{v}_{m2} &= \underline{b}_{m2}\dot{F}_2 = 5 \cdot 10^{-2}e^{-i90^\circ} \cdot 50e^{i0^\circ} = 2,5e^{-i90^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{v}_{k2} &= \underline{b}_{k2}\dot{F}_2 = 5 \cdot 10^{-2}e^{i90^\circ} \cdot 50e^{i0^\circ} = 2,5e^{i90^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{v}_{r2} &= g_2\dot{F}_2 = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 50e^{i0^\circ} = 7,143e^{i0^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

Данным примера 2 соответствует векторная диаграмма на рис. 3.

#### Схема последовательно-параллельного соединения (рис. 4)

С учетом теоремы 1:  $\underline{y}_2 = 1/\underline{z}_2$ .

С учетом теоремы 3:  $\underline{y} = \underline{y}_1 + \underline{y}_2$ .

С учетом формулы (2) скорость штока  $\dot{v} = \underline{y}\dot{F}$ .

*Пример 3.* Отличие от примера 1 состоит в том, что элементы соединены последовательно-параллельно:

$$\begin{aligned} \underline{y}_2 &= 1/\underline{z}_2 = 1/(12,207e^{i55^\circ}) = \\ &= 8,192 \cdot 10^{-2}e^{-i55^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с}; \\ \underline{y} &= \underline{y}_1 + \underline{y}_2 = 15,135 \cdot 10^{-2}e^{i19,29^\circ} + \\ &+ 8,192 \cdot 10^{-2}e^{-i55^\circ} = 19,061 \cdot 10^{-2}e^{-i5,126^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с}; \\ \dot{v} &= \dot{F}\underline{y} = 100 \cdot 19,061 \cdot 10^{-2}e^{-i5,126^\circ} = \\ &= 19,061e^{-i5,126^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{v}_2 &= \dot{F}\underline{y}_2 = 100 \cdot 8,192 \cdot 10^{-2}e^{-i55^\circ} = 8,192e^{-i55^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{v} &= -\dot{v}_1 + \dot{v}_2 = 15,135e^{i19,29^\circ} + 8,192e^{-i55^\circ} = \\ &= 19,061e^{-i5,126^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

Данным примера 3 соответствует векторная диаграмма на рис. 5.

*Пример 4.* Для последовательно-параллельного (двойного) резонанса [10]. Отличие от примера 2 состоит в том, что элементы соединены последовательно-параллельно:

$$\begin{aligned} \underline{y}_1 &= 1/\underline{z}_1 = g_1 = \underline{y}_2 = 1/\underline{z}_2 = g_2 = \\ &= 1/(12,207e^{i55^\circ}) = 14,286 \cdot 10^{-2}e^{i0^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с}; \end{aligned}$$

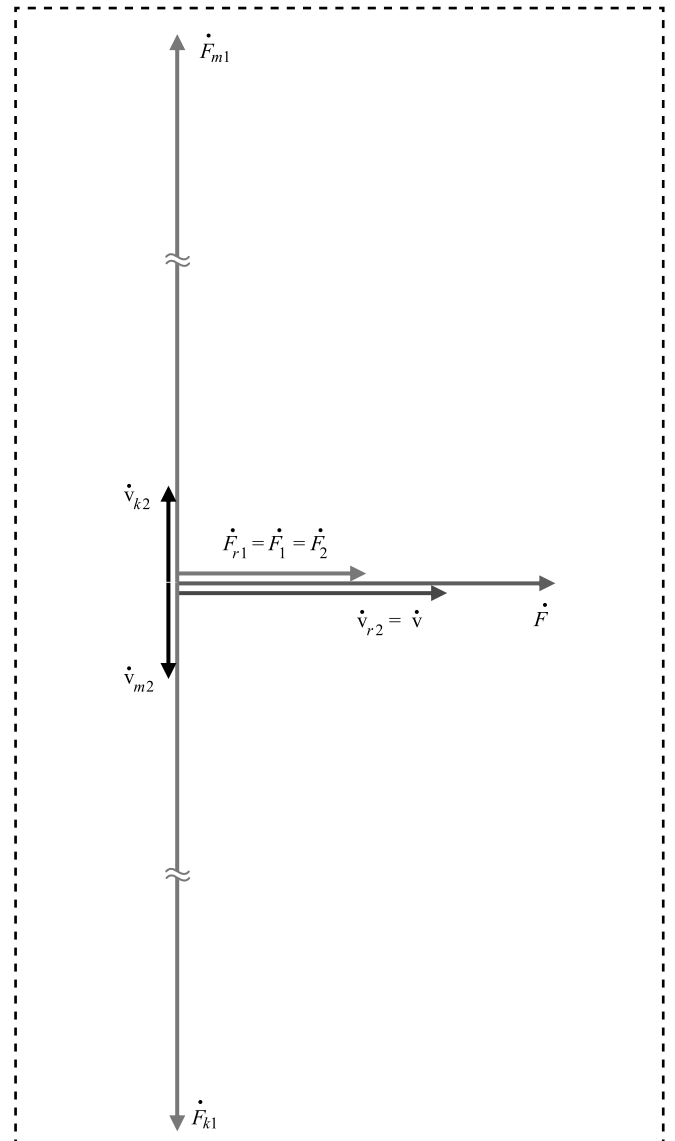


Рис. 3. Параллельно-последовательный (двойной) резонанс

$$\begin{aligned} \underline{y} &= \underline{y}_1 + \underline{y}_2 = 2 \cdot 14,286 \cdot 10^{-2}e^{i0^\circ} = \\ &= 28,571 \cdot 10^{-2}e^{i0^\circ} \text{ кг}^{-1} \cdot \text{с}; \\ \dot{v} &= \dot{F}\underline{y} = 100 \cdot 28,571 \cdot 10^{-2}e^{i0^\circ} = 28,571e^{i0^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \end{aligned}$$

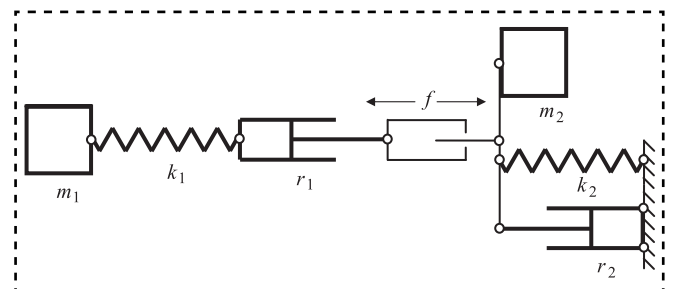


Рис. 4. Схема последовательно-параллельного соединения

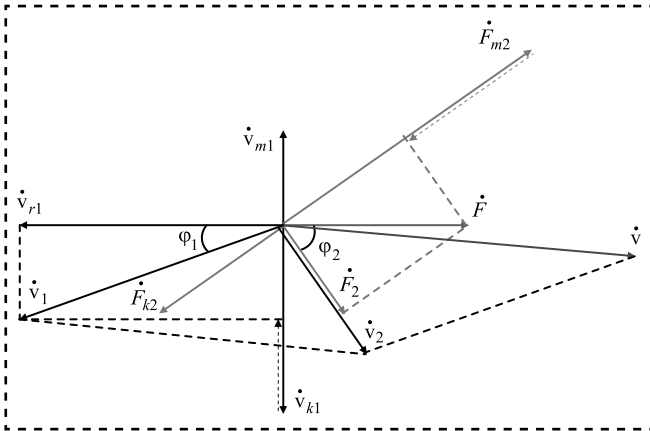


Рис. 5. Последовательно-параллельное соединение

$$\begin{aligned} \dot{v} &= -\dot{v}_1 + \dot{v}_2; \\ -\dot{v}_1 &= -\dot{F}y_1 = \dot{v}_2 = \dot{F}y_2 = \\ &= 100 \cdot 14,286 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} = 14,286 e^{i0^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ -\dot{v}_{m1} &= \underline{b}_{m1} \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 100 e^{i0^\circ} = \\ &= 5 e^{-i90^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \end{aligned}$$

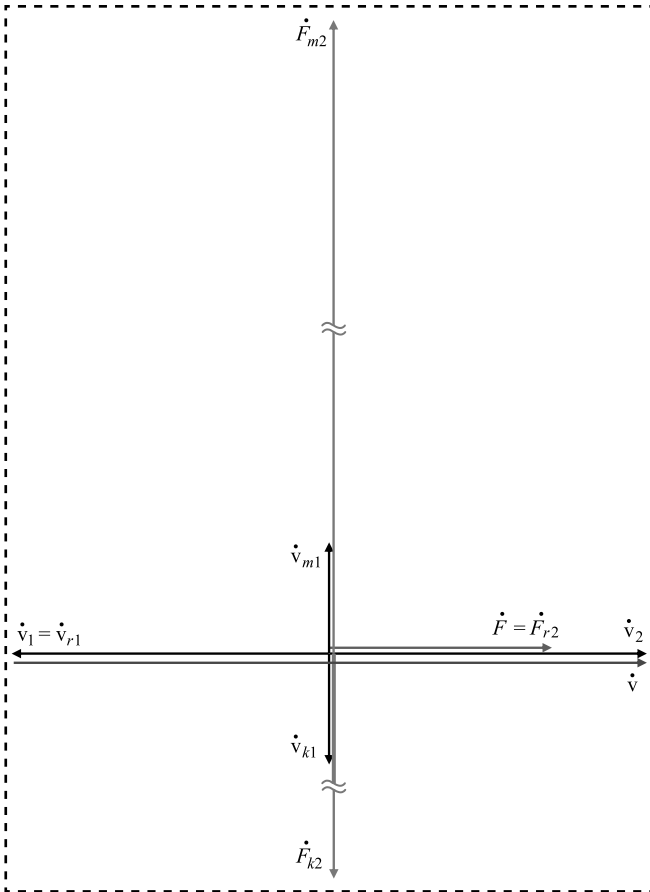


Рис. 6. Последовательно-параллельный (двойной) резонанс

$$\begin{aligned} -\dot{v}_{k1} &= \underline{b}_{k1} \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 100 e^{i0^\circ} = 5 e^{i90^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ -\dot{v}_{r1} &= -g_1 \dot{F} = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 100 e^{i0^\circ} = \\ &= 14,286 e^{i0^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{F}_{m2} &= \underline{x}_{m2} \dot{v}_2 = 20 e^{i90^\circ} \cdot 14,286 e^{i0^\circ} = 285,714 e^{i90^\circ} \text{ Н}; \\ \dot{F}_{k2} &= \underline{x}_{k2} \dot{v}_2 = 20 e^{-i90^\circ} \cdot 14,286 e^{i0^\circ} = 285,714 e^{-i90^\circ} \text{ Н}; \\ \dot{F}_{r2} &= \dot{F}_2 = \dot{F} = r_2 \dot{v}_2 = 7 e^{i0} \cdot 14,286 e^{i0^\circ} = 100 e^{i0^\circ} \text{ Н}. \end{aligned}$$

Данным примера 4 соответствует векторная диаграмма на рис. 6.

### Характер реактивности импеданса

Если

$$\begin{aligned} \dot{F} &= F e^{i0}; \\ \underline{z} &= r + \underline{x}_m = \sqrt{r^2 + x_m^2} e^{i \arctg \frac{x_m}{r}} = z e^{i\varphi}, \end{aligned}$$

то

$$\dot{v} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{F e^{i0}}{z e^{i\varphi}} = \frac{F}{z} e^{-i\varphi}.$$

Пример 5. При тех же исходных данных:

$$\begin{aligned} \underline{z} &= \sqrt{r^2 + x_m^2} e^{i \arctg \frac{x_m}{r}} = \sqrt{7^2 + 20^2} e^{i \arctg \frac{20}{7}} \approx \\ &\approx 21,19 e^{i70,71^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{v} &= \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{100 e^{i0}}{21,19 e^{i70,71^\circ}} \approx 4,719 e^{-i70,71^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

Данным примера 5 соответствует векторная диаграмма на рис. 7.

Пример 6. Пусть теперь  $\underline{z} = r + \underline{x}_k = \sqrt{r^2 + x_k^2} e^{i \arctg \frac{x_k}{r}} = z e^{i\varphi}$ :

$$\begin{aligned} \underline{z} &= \sqrt{r^2 + x_k^2} e^{i \arctg \frac{x_k}{r}} = \\ &= \sqrt{7^2 + 10^2} e^{i \arctg \frac{10}{7}} \approx 12,207 e^{i55^\circ} \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}; \\ \dot{v} &= \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{100 e^{i0}}{12,207 e^{i55^\circ}} \approx 8,192 e^{i55^\circ} \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}. \end{aligned}$$

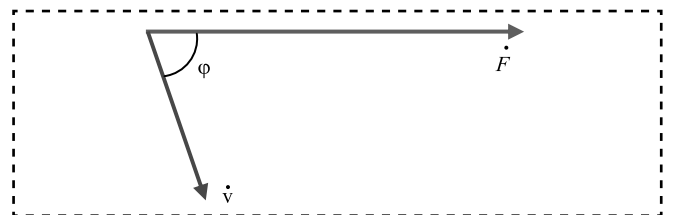


Рис. 7. "Инертный" импеданс

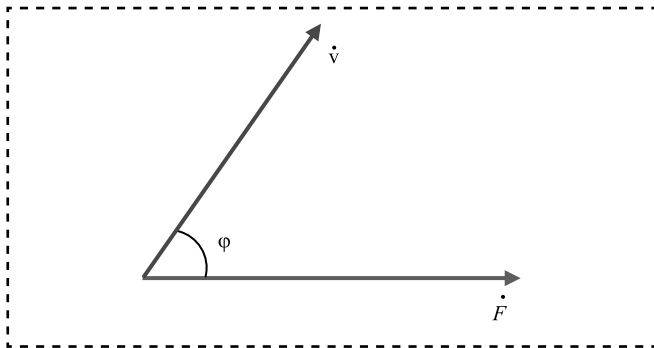


Рис. 8. "Упругий" импеданс

Данным примера 6 соответствует векторная диаграмма на рис. 8.

На основе примеров 5 и 6 докажем теоремы 5 и 6.

**Теорема 5.** Если сила опережает скорость по фазе, то нагрузка инертная, если отстает, то — упругая. Если фазы силы и скорости совпадают, то — резистивная (активная).

**Замечание.** При  $\underline{x} = \underline{x}_m + \underline{x}_k$  и  $\underline{x}_m < \underline{x}_k$  импеданс "упругий". При  $\underline{x}_m > \underline{x}_k$  импеданс "инертный".

**Теорема 6.** Если  $\underline{x}_m \neq \underline{x}_k$ , то реактивный характер импеданса изменяется на противоположный при замене схемы соединения элементов (с последовательного на параллельное или наоборот).

**Доказательство.** Если  $\underline{x}_m > \underline{x}_k$  и соединение параллельное, то

$$\underline{x} = \underline{x}_m + \underline{x}_k = \left( m\omega - \frac{k}{\omega} \right) e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

С учетом замечания к теореме 5 импеданс является "инертным", при этом фаза  $i\pi/2 > 0$ .

Если эти же элементы соединить последовательно, то

$$\underline{b} = \underline{b}_k + \underline{b}_m = \left( \frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right) e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{\omega m - k/\omega}{km} e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

С учетом следствия из теоремы 1

$$\underline{x} = \frac{1}{\underline{b}} = \frac{km}{\omega m - k/\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}}.$$

Фаза поменяла знак ( $-i\pi/2 < 0$ ). Другими словами, импеданс стал "упругим".

При  $\underline{x}_m < \underline{x}_k$  можно сделать те же выводы. Теорема доказана.

### Заключение

Для рассмотренных разветвленных механических схем классические методы, основанные

на решении дифференциальных уравнений второго порядка, многократно усложняются и требуют решения систем уравнений, которые сводятся к дифференциальным уравнениям более высоких порядков.

Использование символического (комплексного) описания механических процессов и систем позволяет применять вместо этого простые и компактные алгебраические методы, трудоемкость которых меньше в десятки раз.

Векторные диаграммы, не являясь необходимой составляющей исследования механических систем, имеют существенное методическое значение, поскольку показывают количественные и фазные соотношения между параметрами систем.

### Библиографический список

1. Попов И.П. Дифференциальные уравнения двух механических резонансов // Прикладная физика и математика. 2019. № 2. С. 37–40. DOI: 10.25791/pfim.02.2019.599.
2. Попов И.П. О резонансе и антирезонансе // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2019. № 4. С. 45–48.
3. Попов И.П. Free harmonic oscillations in systems with homogeneous elements // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 2012. Vol. 76. Iss. 4. P. 393–395. DOI: 10.1016/j.jappmathmech.2012.09.005.
4. Попов И.П. Theory of a Multi-Inert Oscillator, Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. No. 8. P. 16–20. DOI: 10.3103/S1052618820080105.
5. Эрлих Б.М. Методика активного возбуждения колебаний с характеристиками сложного типа в машинах и механизмах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 3. С. 131–136.
6. Варганов М.В., Чан Ч. Та. Математическая модель роботизированной сборки при наличии вращения схвата и низкочастотных колебаний // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 7. С. 299–304.
7. Кристаль М.Г., Суриков А.А. Настройка грузозачного устройства с двухкомпонентным виброприводом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 6. С. 285–288.
8. Лапшин В.П., Христофорова В.В., Халина Е.В. Моделирование динамики вибрационных движений индентора при выполнении операции выглаживания с учетом влияния термодинамической подсистемы // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 4. С. 166–172.
9. Волков Е.Б., Ситдикова С.В. Анализ режимных параметров вибрационного грохота на основе динамической модели его работы // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 1. С. 31–35.
10. Попов И.П. Резонансы сил и скоростей // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2019. № 4 (47). С. 62–66. DOI: 10.17072/1993-0550-2019-4-62-66.

Ю.З. Житников, д-р техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева),

А.А. Лошкарев (АО "ВНИИ "Сигнал", г. Ковров)

E-mail: kgta\_tms@mail.ru

## Обоснование скорости ударного взаимодействия кулачков гайковерта для упрочнения их поверхностей на заданную глубину

Обоснована скорость ударного взаимодействия кулачков гайковерта ударного действия для обеспечения упрочнения взаимодействующих поверхностей на заданную глубину.

The speed of the impact interaction of the impact wrench cams has been substantiated to ensure hardening of the interacting surfaces to a given depth.

**Ключевые слова:** гайковерт ударного действия, скорость взаимодействия кулачков, упругопластическая деформация.

**Keywords:** impact wrench, speed of interaction of the cams, elastoplastic deformation.

В процессе эксплуатации гайковертов ударного действия возникают упругопластические деформации взаимодействующих поверхностей кулачков бойка и наковальни. Для исключения этого явления проводят упрочнение поверхностей на основе специальных технологических приемов, в то время как упрочнение поверхностей на заданную глубину можно обеспечить за счет ударного взаимодействия кулачков при заданных скоростях вращения бойка в процессе испытаний и отладки гайковерта.

Частоту вращения бойка с учетом потери энергии при ударах, при которой на поверхностях кулачков цилиндрической формы возникают только упругие деформации находим из выражения:

$$\phi = \sqrt{\frac{4[\sigma_{\text{см}}]l}{J_z} \sqrt{\frac{1,322[\sigma_{\text{см}}]R(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}}} \left[ r - \sqrt{r^2 - \frac{1,322[\sigma_{\text{см}}]R(E_1 + E_2)}{E_1 E_2}} \right] \frac{1}{r}, \quad (1)$$

где  $[\sigma_{\text{см}}]$  — допустимое напряжение на смятие взаимодействующих поверхностей кулачков;

$l$  — длина взаимодействия по цилиндрическим поверхностям;

$J_z$  — приведенный момент инерции элементов гайковерта до оси бойка;

$R$  — радиус цилиндрической части кулачка;

$E_1, E_2$  — модули упругости материалов бойка и наковальни;

$r$  — средний радиус положения кулачков относительно осей вращения бойка и наковальни.

Обоснуем математическую зависимость угловой скорости вращения бойка с учетом потерь энергии при ударах, при которой на взаимодействующих поверхностях кулачков цилиндрической формы возникали бы упругопластические деформации заданной глубины с остаточной пластической деформацией.

Для описания динамики процесса воспользуемся дифференциальным уравнением враща-

тельного движения в проекции на ось вращения бойка:

$$J_z \ddot{\phi} = \sum M_{J_z}^{(e)}, \quad (2)$$





где  $\ddot{\phi}$  — проекция углового ускорения на ось вращения;

$\sum M_{j_z}^{(e)}$  — сумма действующих внешних сил в проекции на ось вращения.

При ударном взаимодействии тел учитывают только силы удара, а остальными силами можно пренебречь. После интегрирования уравнения (2) с учетом, что скорость бойка в конце удара равна нулю, запишем [1, 4]:

$$J_z \dot{\phi}_z = M_{уд} \Delta t \quad (3)$$

где  $\dot{\phi}_z$  — проекция угловой скорости вращения бойка на ось;

$M_{уд}$  — момент от силы удара, действующий на кулачки наковальни;

$\Delta t$  — время удара.

Получили дифференциальное уравнение с тремя неизвестными —  $\dot{\phi}_z$ ,  $M_{уд}$ ,  $\Delta t$ .

Для решения уравнения воспользуемся выражением равенства работ при ударе  $A_{уд}$  и медленном сжатии  $A_{см}$  при условии равенства деформаций [1, 4]. Учитывая, что при ударе поверхность сминается, запишем:

$$A_{уд} = A_{см} \quad (4)$$

Работа момента силы удара:

$$A_{уд} = M_{уд} h_{уд} \quad (5)$$

где  $h_{уд}$  — деформация взаимодействующих поверхностей при ударе.

Считаем, что процесс деформации поверхностей происходит равнозамедленно:

$$h_{уд} = v_{ср} \Delta t = \frac{v_1 + v_0}{2} \Delta t = \frac{\dot{\phi}_z}{2} \Delta t; \quad (6)$$

$$v_0 = \dot{\phi}_z.$$

Окончательно работу при ударе кулачков находим из выражения:

$$A_{уд} = M_{уд} \frac{\dot{\phi}_z}{2} \Delta t \quad (7)$$

Работа силы смятия при медленном сжатии взаимодействующих поверхностей кулачков бойка и наковальни с учетом возникновения на их поверхностях упругопластических деформаций равна:

$$A_{см} = A_{см}^{уп} + A_{см}^{пл}, \quad (8)$$

где  $A_{см}^{уп}$  — работа силы смятия при упругой деформации взаимодействующих поверхностей;

$A_{см}^{пл}$  — работа силы смятия при пластической деформации взаимодействующих поверхностей.

Остаточная пластическая деформация поверхностей упрочняющего слоя  $h$  [2, 3]:

$$h = \frac{P - P_0}{2\pi R_{пр} HD}, \quad (9)$$

где  $P$  — сила, под действием которой на поверхностях кулачков возникает упругопластическая деформация;

$P_0$  — сила, под действием которой на поверхностях кулачков возникают только упругие деформации;

$R_{пр}$  — приведенный радиус кривизны поверхностей кулачков;

$HD$  — пластическая твердость материалов кулачков.

Согласно выражению (9) можно записать:

$$P = P_0 + 2\pi R_{пр} HD h. \quad (10)$$

Приведенный радиус кривизны равен:

$$R_{пр} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (11)$$

где  $R_1 = R_2 = R$  — радиусы цилиндрических поверхностей кулачков.

Пластическую твердость, МПа, материалов кулачков бойка и наковальни находим из выражения [2, 3]:

$$HD = \frac{88\,300}{130 - HRC}, \quad (12)$$

где HRC — твердость материала по Роквеллу.

С учетом допустимого напряжения сила упругого смятия [5]:

$$P_0 = F_{см} = [\sigma_{см}] S_{см}, \quad (13)$$

где  $S_{см}$  — площадь взаимодействия кулачков:

$$S_{см} = 2al, \quad (14)$$

где  $a$  — полуось пятна контакта взаимодействующих цилиндрических поверхностей;

$l$  — длина взаимодействия.

Полуось пятна контакта цилиндрических поверхностей:

$$a = 1,5223 \sqrt{\frac{q R_1 R_2}{E (R_1 + R_2)}}, \quad (15)$$

где  $q$  — удельная нагрузка на единицу длины взаимодействия;

$E$  — приведенный модуль упругости материалов кулачков.

Удельную нагрузку на единицу длины взаимодействия находим из выражения:

$$P = F_{\text{см}} = \frac{3}{4}ql. \quad (16)$$

Приведенный модуль упругости:

$$E = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}, \quad (17)$$

где  $E_1, E_2$  — модули упругости материалов кулачков бойка и наковальни.

Подставим в выражение (14) параметры из выражений (13), (14), (16), (17) и после преобразований получим:

$$a = \sqrt{\frac{1,522^3 3 [\sigma_{\text{см}}] R (E_1 + E_2)}{8E_1E_2}}. \quad (18)$$

Работа от силы упругого смятия равна:

$$A_{\text{см}}^{\text{уп}} = P_0 h_{\text{см}}^y. \quad (19)$$

Величина упругого смятия [2, 3]:

$$h_{\text{см}}^y = dy = 1,231 \sqrt[3]{\frac{P_0^2 (R_1 + R_2)}{E^2 R_1 R_2}}, \quad (20)$$

где  $P_0 = F_{\text{см}}$ .

С учетом формул (13), (14), (16), (17) после преобразований выражение (20) можно записать:

$$dy = 1,873 [\sigma_{\text{см}}] \sqrt[3]{\frac{3l^2 (E_1 + E_2)}{8E_1^2 E_2^2}}. \quad (21)$$

Окончательно работу от силы упругого смятия запишем:

$$A_{\text{см}}^{\text{уп}} = 2 [\sigma_{\text{см}}] \sqrt{\frac{1,522^3 3 [\sigma_{\text{см}}] R (E_1 + E_2)}{8E_1E_2}} \times \\ \times 1,873 [\sigma_{\text{см}}] \sqrt[3]{\frac{3l^2 (E_1 + E_2)}{8E_1^2 E_2^2}}. \quad (22)$$

Работу от силы пластического смятия с учетом выражений (11), (12) находим из выражения:

$$A_{\text{см}}^{\text{пл}} = 2\pi R_{\text{пр}} HD hh; \quad (23)$$

$$A_{\text{см}}^{\text{пл}} = 2\pi \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \frac{88300}{130 - \text{HRC}} h^2 = \\ = \pi R \frac{88300}{130 - \text{HRC}} h^2. \quad (24)$$

Подставим в выражение равенства работ (4) выражения (7), (22), (24):

$$M_{\text{уд}} \frac{\dot{\phi}_z}{2} \Delta t = 3,746 [\sigma_{\text{см}}] \times \\ \times \sqrt[2]{\frac{1,522^3 3 [\sigma_{\text{см}}] R (E_1 + E_2)}{8E_1E_2}} \sqrt[3]{\frac{3l (E_1 + E_2)^2}{8E_1^2 E_2^2}} + \\ + \pi R \frac{88300}{130 - \text{HRC}} h^2. \quad (25)$$

Найдем угловую скорость вращения бойка в момент удара его кулачков о кулачки наковальни:

$$\dot{\phi}_z = \\ = \sqrt{\frac{1}{J_z} \left[ 3,746 [\sigma_{\text{см}}] \sqrt[2]{\frac{1,522^3 3 [\sigma_{\text{см}}] R (E_1 + E_2)}{8E_1E_2}} \times \right. \\ \left. \times \sqrt[3]{\frac{3l^2 (E_1 + E_2)^2}{8E_1^2 E_2^2}} + \pi R \frac{88300}{130 - \text{HRC}} h^2 \right]}. \quad (26)$$

Из выражения (26) найдем зависимость глубины упрочняющего слоя  $h$  от угловой скорости вращения бойка  $\dot{\phi}_z$ .

## Заключение

Получено математическое выражение зависимости глубины упрочняющего слоя от угловой скорости вращения бойка в момент удара его кулачков о кулачки наковальни.

## Библиографический список

1. **Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Динамика движения элементов механизмов при упругом и упругопластическом ударах о неподвижные и подвижные тела. Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2014. 80 с.
2. **Демидов С.Н.** Теория упругости: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 432 с.
3. **Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И.** Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
4. **Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников и др.: под общ. ред. проф. Ю.З. Житникова.** Старый Оскол: ТНТ, 2009. 656 с.
5. **Феодосьев В.И.** Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1970. 544 с.



**В.В. Новиков**, д-р техн. наук

(Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С. Нахимова, г. Севастополь),

**К.Н. Осипов**, канд. техн. наук (Севастопольский государственный университет),

**С.А. Маврин**, канд. техн. наук (Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С. Нахимова, г. Севастополь)

E-mail: assistanttmm@mail.ru

## Моделирование сложных технических объектов морской номенклатуры

*Предложен подход, а также программный комплекс для моделирования современных конструктивно сложных изделий морской номенклатуры по результатам наблюдений за параметрами изделий в реальном времени эксплуатации или испытаний. Преимущество предлагаемого подхода перед существующими связано с использованием упрощенных моделей за счет установления стационарных зависимостей между нестационарными случайными последовательностями изменений исследуемых параметров изделий.*

*An approach to the design of empirical mathematical models and software based on the results of measurements for the description complex technical objects of marine nomenclature. The procedure is based on the statistical modeling of the tested product based on determining the presence of dependences between the diagnostic variables, model verification, and the following use of the models to predict the values of the parameters and to verify the determined dependences.*

**Ключевые слова:** моделирование, коинтеграция, алгоритмизация, диагностика.

**Keywords:** modeling, cointegration, algorithms, diagnostics.

**В** ходе решения задач прогнозирования и оценки технических состояний объектов и изделий военно-морской номенклатуры приходится иметь дело с количественным анализом результатов измерений параметров, характеризующих эволюцию технического состояния во времени. Результатом этого анализа, что эквивалентно анализу технических состояний, является решение относительно наличия у объектов требуемых свойств, обеспечивающих пригодность их к дальнейшему применению и характеризующих правильность выполнения заданных функций [1–3]. Инструмент анализа — модель, позволяющая выполнить оценку текущего состояния и прогнозирование будущего развития состояний объекта, исходя из гипотезы, что основные факторы и тенденции, имеющие место в прошлом периоде эксплуатации, сохранятся на период прогноза или что можно обосновать и учесть направление развития (изменение) технических состояний в рассматриваемой перспективе [4]. Поэтому решение о годности изделий к эксплуатации предпола-

гает наличие одной или нескольких моделей, которые должны зависеть от свойств объектов, целевого содержания прогнозирования и условий оценивания.

В связи с непрерывно возрастающей сложностью современных изделий военно-морской номенклатуры, ужесточением требований к достоверности и точности результатов оценки и прогнозирования их технических состояний при одновременном сокращении продолжительности диагностических операций инженеры и исследователи сталкиваются с задачами построения моделей по коротким статистическим рядам в условиях недостатка, а в некоторых случаях и отсутствия априорной информации об исследуемых системах. В результате в процессе построения прогнозирующих моделей возникает задача оценки преимущества данных. Использование устаревших данных для моделирования оказывается бесполезным и даже оказывающим негативное влияние. В подобных случаях классические статистические модели неприемлемы, так как в резуль-

тате прогнозирования необходимо выявлять не то, как процесс развивался в среднем, а как будет развиваться его тенденция, существующая в данный момент. Это означает, что процесс моделирования должен основываться на использовании малого наиболее "свежего" объема данных [4]. По указанной причине в ходе эксплуатации целесообразно наряду с полными, высокоточными, многофункциональными математическими моделями, описываемыми, как правило, нелинейными детерминированными и стохастическими дифференциальными уравнениями, использовать специализированные и упрощенные модели, которые могут быть наделены адаптивными свойствами [3, 5, 6]. Применение таких моделей может позволить получить требуемые результаты в указанных условиях на ограничение сроков диагностических операций с минимальными материальными, энергетическими и трудовыми затратами.

В терминах современной обобщенной теории систем, а также в терминах теории автоматического управления задача построения моделей рассматриваемого класса формулируется как определение структуры, параметров и состояний объектов по наблюдениям, т.е. как задача идентификации [3, 5, 7]. В соответствии с этим в общей проблематике идентификации (моделирования) могут быть выделены модели нескольких типов. Это модели объекта диагностирования, тестовых (диагностических) воздействий, диагностических состояний, помех в каналах передачи экспериментальной информации, прогнозирующие модели и, наконец, модели оценки технических состояний при рассмотрении процесса диагностирования как некоторой сложной системы. Указанная классификация моделей обусловлена сложностью технологического процесса диагностирования, а также отсутствием возможности учесть в одной модели все внутренние связи между ее элементами.

Решение задач моделирования по результатам наблюдений за объектом, особенно в условиях автоматизированных производств, неразрывно связано с определением принципов формирования алгоритмов идентификации, которые связаны с выбором метода, использующего наблюдаемые данные для аппроксимации уравнения объекта, выбором функции потерь в результате этой аппроксимации (критерия качества идентификации) и выбором метода минимизации функции потерь (оптимизации

критерия). Я.З. Ципкин в работе [8] установил, что модели, полученные реализацией указанных принципов, дают, в первую очередь, качественное описание процессов, протекающих в объектах. Количественно модель должна уточняться в режиме нормальной работы изделия по непрерывно обновляющимся измерительным последовательностям, используя адаптивные свойства. Параметры настраиваемой (адаптивной) модели, обеспечивающие экстремум выбранного критерия, характеризующего качество идентификации, должны определяться по наблюдаемым входным воздействиям и выходным величинам.

В современных работах, посвященных идентификации динамических объектов и систем, используются различные модели, критерии и алгоритмы. Большое внимание уделяется рекуррентным алгоритмам, осуществляющим адаптацию прогнозирующей модели к идентифицируемому объекту на основе получения и надлежащей обработки текущей информации о состоянии объекта.

Оптимизация рекуррентных алгоритмов идентификации с точки зрения асимптотической скорости их сходимости тесно связана с учетом априорной информации об объекте и о статистических свойствах приложенных к объекту помех. Другими словами, эффективность существующих методов, алгоритмов и процедур идентификации в значительной степени зависит от информации о порядке уравнений объекта, точке приложения помех, длительности временной, статической и динамической характеристики объекта и т. д. Решением проблемы восстановления априорной информации в указанных условиях является использование физических соображений, а в некоторых случаях и жизненного опыта для задания приближенных значений и диапазонов неизвестных параметров, но качество полученных результатов, как правило, оказывается невысоким.

Применение рекуррентных адаптивных алгоритмов обработки, спроектированных для анализа стохастических наблюдений за объектами и требующих существенно меньшего объема априорных сведений и способных приспособляться к конкретным эмпирическим данным, позволяет решать задачу только в отдельных случаях, так как такие алгоритмы, в основном, являются нелинейными и приобретают свойства, близкие к оптимальным, только по мере накопления большого объема

данных [3]. В результате оптимальная модель должна быть не только максимально возможно простой, но и обладать свойством, обеспечивающим совпадение параметров модели с параметрами объекта даже в условиях отсутствия достоверной априорной информации об объекте.

В общем виде практически все существующие на сегодня модели, используемые для описания изделий морской номенклатуры, в той или иной степени обладают необходимыми свойствами. Так, например, часто используемые методы экстраполяции, основанные на регрессионных кривых, содержат некоторый элемент адаптации, когда с каждым новым наблюдением параметры авторегрессионных кривых пересчитываются, уточняются. Через достаточно большой промежуток времени может быть заменен даже тип кривой. Однако степень адаптации в таких моделях весьма незначительна, к тому же с течением времени она снижается вместе с увеличением общего числа наблюдений и, соответственно, с уменьшением в выборке удельного веса каждой новой точки [4].

Методы кусочно-линейной аппроксимации, использование которых ведет к уменьшению "памяти" модели, к "забыванию" старых данных и построению линий регрессии на искусственно

ограниченном количестве информации, лучше учитывают новые тенденции, быстрее приспосабливаются к изменившимся характеристикам процесса. Однако методы кусочно-линейной аппроксимации и экстраполяции очень чувствительны к мощности помех в измерительных каналах связи, а также к случайным отклонениям. Недостатком является также то, что ценность информации в пределах интервала (ширины окна) аппроксимации считается одинаково независимой.

По мнению авторов данной работы, решение задачи моделирования конструктивно сложных современных изделий морской номенклатуры, например таких, как дизель-генераторы, воздухоудные нагнетатели, компрессоры, системы навигации и позиционирования и т. д. может быть достигнуто использованием методов многомерного статистического коинтегрального анализа, которые, в отличие от традиционных методов, менее чувствительны к недостатку априорной и искаженной измерительной информации, учитывают нестационарность случайных последовательностей измерений параметров, обладают быстрой адаптацией к изменяющимся измерительным последовательностям [9].

Предлагаемый алгоритм моделирования содержит следующие шаги (рис. 1).

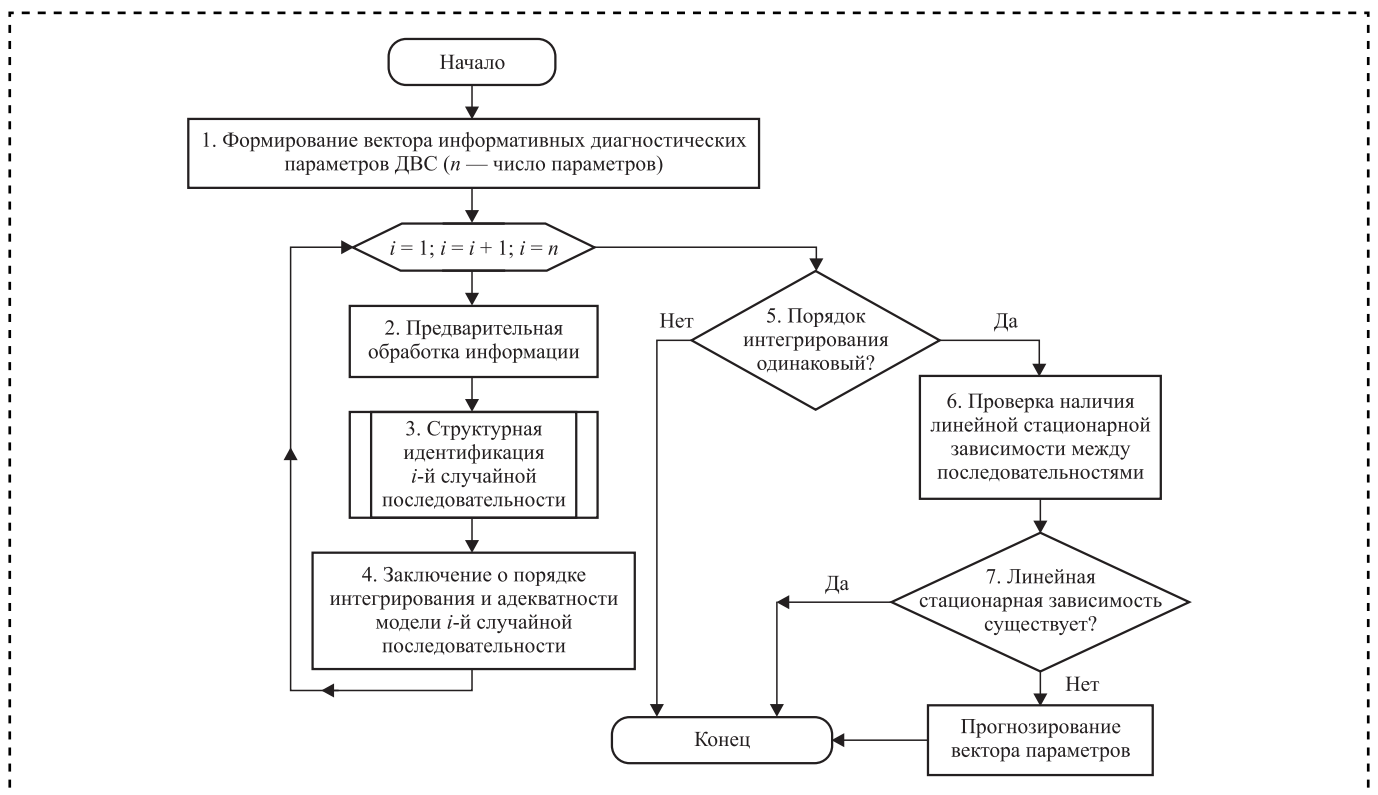


Рис. 1. Алгоритм моделирования



1. Формирование вектора информативных параметров. Определяют инвариантные свойства возможных состояний испытуемых объектов, используемые для понижения мощности множества информативных параметров. Параметры ранжируют по информационному критерию Кульбака—Лейблера, определяющему расстояние между множествами параметров для различных состояний испытуемых объектов; оценивается эффективность разделения этих состояний. Наиболее информативными считаются параметры, которым соответствуют наибольшие значения информационного критерия, так как они заключают в себе максимум различающей информации. Параметры, вклад которых в информационный функционал невелик, исключают из рассмотрения.

2. Предварительная обработка информации: определение статистических характеристик случайных последовательностей (выборочная дисперсия, выборочное среднее), корреляционный и ковариационный анализ, тест Йохансена на казуальность. Результаты используют для выявления вида и структуры взаимосвязей между параметрами изделий.

3. Определение характеристик случайных последовательностей, полученных из исходных путем взятия разностей соседних элементов, и их математическое описание в виде суммы составляющих: тренда — устойчивого систематического изменения значений параметров в течение испытаний; константы, определяющей

величину и направление отклонения последовательности от тренда; члена авторегрессии, определяющего связь с предшествующими состояниями объекта, инновации (невязки), определяющей величину ошибки моделирования на предыдущем шаге, случайного шума.

4. Оценка (по нескольким известным методам) адекватности математического описания, полученного на предыдущем шаге, реальным процессам.

5. Проверка существования линейной стационарной зависимости между последовательностями изменения всех параметров с одинаковой структурой моделей.

6. Верификация итоговой модели, используя статистические критерии значимости.

Программная реализация предлагаемого алгоритма может быть выполнена в двух вариантах: десктоп-приложение или веб-реализация. Независимо от способа реализации приложение содержит подсистему считывания данных, базу данных, подсистему анализа данных, а также графический интерфейс. Структурная схема приложения и вид графического интерфейса представлены на рис. 2 и 3.

Для запуска процесса моделирования оператору необходимо выбрать модель (номенклатурный номер) изделия и ввести начальные условия моделирования (выбрать типы изделия, задать рабочую температуру рабочих жидкостей и газов и т. д.).

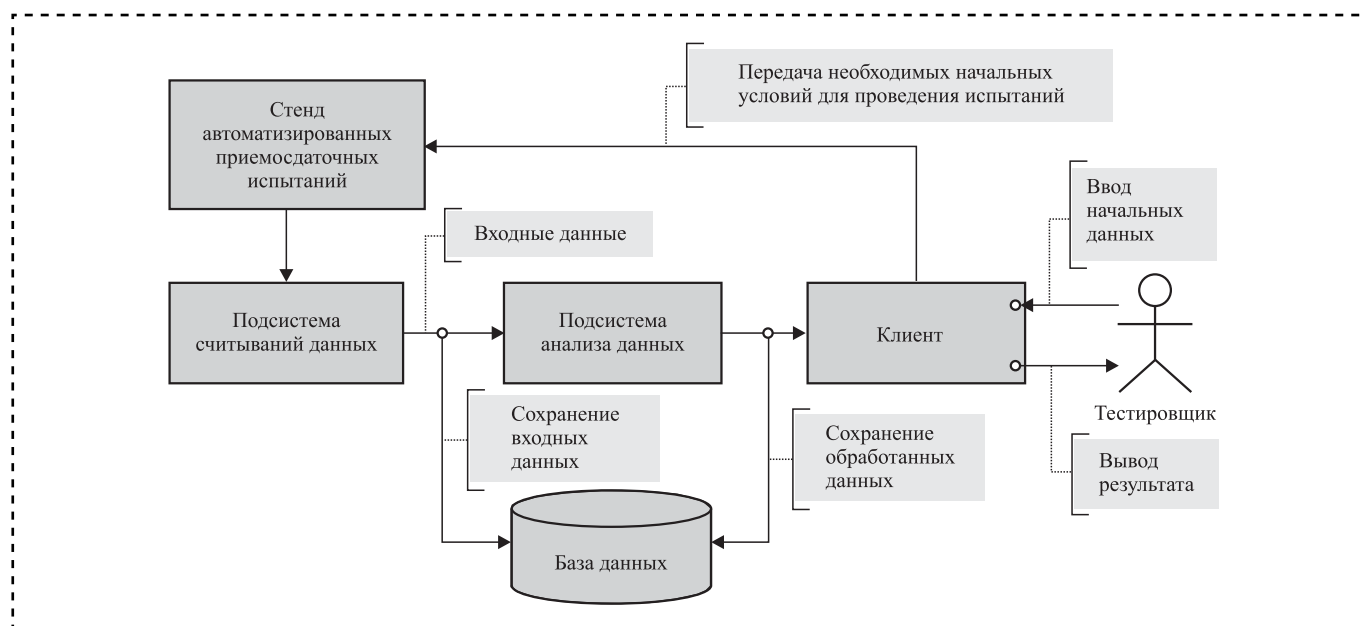


Рис. 2. Структурная схема системы моделирования

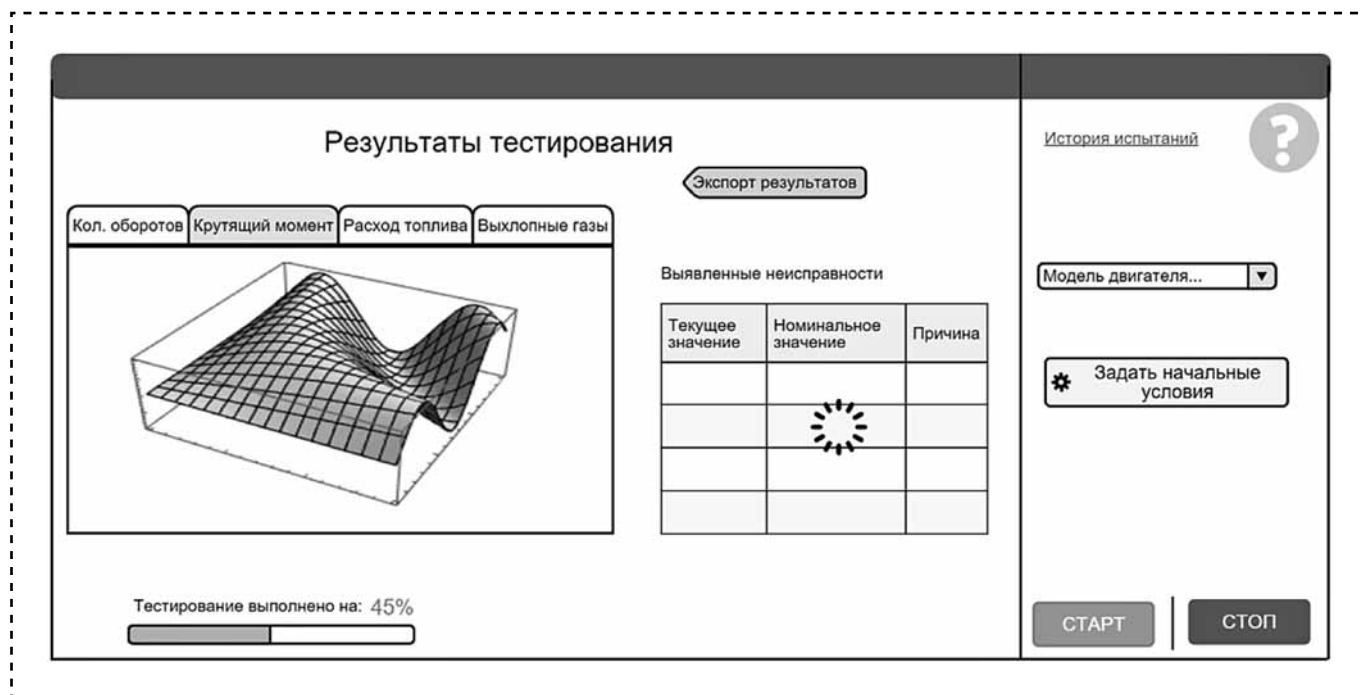


Рис. 3. Графический интерфейс клиента

В процессе работы приложения доступны следующие опции:

- 1) остановка текущей сессии;
- 2) наблюдение за ходом моделирования в режиме реального времени (например, по графикам процессов изменения ошибок моделирования);
- 3) экспресс-результат выявленных проблем;
- 4) экспорт результатов в один из форматов (pdf, excel, html, json);
- 5) доступ к архиву;
- 6) доступ к результатам моделирования;
- 7) построение прогнозных значений моделируемых параметров.

### Заключение

Главное преимущество предлагаемого алгоритма и его программной реализации перед существующими связано с использованием упрощенных моделей за счет установления стационарных зависимостей между нестационарными случайными последовательностями изменения исследуемых параметров изделий. Кроме этого, моделирование изделий морской номенклатуры с использованием коинтеграции случайных процессов можно считать инновационным в данной области знаний.

### Библиографический список

1. **Абрамов О.В.** Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4 (24). С. 108—115. DOI 10.21685/2307-4205-2018-4-12.
2. **Новиков В.В., Новикова М.В.** Прогнозирование опасного состояния сложных технических систем // 2017. № 5. С. 50—54.
3. **Голикова В.В.** Идентификация стохастических объектов и процессов в автоматизированной системе производственных приемосдаточных испытаний двигателей внутреннего сгорания: дис. ... канд. тех. наук по специальности 05.13.07. Севастополь: СевНТУ. 2008. 205 с.
4. **Лукашин Ю.П.** Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов: учеб. пос. М.: Финансы и статистика, 2003. 416 с.
5. **Голикова В.В., Первухина Е.Л., Сопин П.К.** Моделирование измерительных последовательностей диагностических параметров ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. 2012. № 2. С. 114—117.
6. **Первухина Е.Л., Осипов К.Н., Рапацкий Ю.Л.** Совершенствование методики приемосдаточных испытаний двигателей внутреннего сгорания после сборки на основе зависимостей между диагностическими параметрами // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 2. С. 93—99.
7. **Первухина Е.Л., Сопин П.К., Голикова В.В.** Оценка состояния машиностроительных изделий в ходе производственных испытаний после сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 10. С. 3—9.
8. **Ципкин Я.З.** Информационная теория идентификации. М.: Наука. Физматлит, 1995. 336 с.
9. **Engle R.E., Granger C.W.J.** Cointegration and Error Correction: Representation, Estimation and Testing // Econometrica. 1987. Vol. 55. P. 251—276.

## Термины и определения по ГОСТ Р 58399—2019. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Общие требования

### Характер взаимодействия оптического излучения с контролируемым объектом

**Метод собственного оптического излучения; метод собственной эмиссии** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров собственного излучения (эмиссии) объекта контроля.

**Метод индуцированного оптического излучения; метод индуцированной оптической эмиссии** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения (эмиссии), генерируемого объектом контроля при постороннем воздействии возбуждения.

*Примечание. Полное название метода может включать термин, описывающий способ возбуждения, например искровой. Методы собственного и индуцированного оптического излучения носят общее название — оптические эмиссионные методы.*

**Метод прошедшего оптического излучения; трансмиссионный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения, прошедшего сквозь объект контроля.

**Метод поглощенного оптического излучения; абсорбционный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров поглощения оптического излучения объектом контроля. В тех случаях, когда величина поглощения определяется по величине интенсивности прошедшего оптического излучения, термины "абсорбционный" и "трансмиссионный" методы эквивалентны.

**Метод отраженного оптического излучения; рефлектометрический метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения, отраженного от объекта контроля.

**Метод рассеянного оптического излучения** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения, рассеянного от объекта контроля.

*Примечание. Полное название метода может включать термин, описывающий механизм рассеяния, например метод упругого, неупругого, рэлеевского, комбинационного (рамановского), стоксова, антистоксова рассеяния света. Частным случаем является нефелометрический метод.*

**Метод люминесцентного оптического излучения; люминесцентный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации люминесцентного излучения объекта контроля и на анализе параметров люминесценции.

*Примечание. Полное название метода может включать термин, описывающий механизм люминесценции: фотолюминесцентный, флуоресцентный, фосфоресцентный, электролюминесцентный метод. Люминесцентный метод является частным случаем метода рассеянного оптического излучения.*

### Первичный информативный физический параметр

**Амплитудный метод оптического излучения; энергетический метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации мощности или интенсивности оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля или иных энергетических характеристик: мощности потока, энергии световых импульсов, освещенности поверхности объекта, яркости объекта.

*Примечание. Полное название метода может включать термин, конкретизирующий регистрируемую характеристику: яркостный, мощностный.*

**Фазовый метод оптического излучения; фазовый оптический метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации фазовых параметров оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля: разности фаз световых волн, набега фазы или вариации фазы по пространству.

**Поляризационный метод оптического излучения; поляризационный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации поляризационных характеристик оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля: ориентации линейной поляризации, направления вращения циркулярной поляризации, коэффициента эллиптичности и ориентации осей эллиптически поляризованной волны, параметров Стокса.

*Примечание. Частным случаем является эллисометрический метод.*

**Геометрический метод оптического излучения; угловой метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации направления распространения оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля: разности углов распространения световых волн или угла отклонения световой волны.

**Спектральный метод оптического излучения; спектральный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе спектральных характеристик оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля: спектров (сплошных, фрагментированных, дискретных), спектральных величин, характеризующих разные шкалы (длины волны, оптической частоты, энергии световых квантов, разности частот и энергий).

*Примечание. Термин "спектральный" может входить в названия других методов неразрушающего контроля, показывая, что соответствующие физические величины относятся к определенным точкам или областям спектра, например спектральный энергетический (спектрофотометрический), спектрополяризационный и т.п. В зависимости от количества*



спектральных полос название метода может включать указание на это: двухволновый, многоволновый, мультиспектральный, гиперспектральный.

**Временной метод оптического излучения; метод с временным разрешением** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации временных характеристик оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля: времени прохождения оптического излучения через объект контроля, времени задержки, времени нарастания или спада.

*Примечание. Термин "с временным разрешением" может входить в названия других методов неразрушающего контроля, показывая, что соответствующие физические величины регистрируются и анализируются как функции времени, например люминесцентный с временным разрешением.*

**Пространственный метод оптического излучения; метод с пространственным разрешением** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации пространственных характеристик оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля, а также физических характеристик оптического излучения как функции одной, двух или трех координат — соответственно методы с одномерным (1D), двумерным (2D), трехмерным (3D) разрешением.

*Примечание. Термин "с пространственным разрешением" может входить в названия других методов неразрушающего контроля, показывая, что соответствующие физические величины регистрируются и анализируются как пространственные распределения, например фазовый с пространственным разрешением, абсорбционный с пространственным разрешением.*

## Способ получения первичной информации

### А. Способ визуального наблюдения объекта контроля

**Визуальный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на наблюдении и анализе объекта контроля непосредственно глазами оператора без использования оптических устройств и приборов.

**Визуально-оптический метод; прямой визуально-оптический метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на наблюдении и анализе объекта контроля с помощью оптических устройств и приборов, в котором имеет место непрерывный ход лучей между глазами оператора и объектом контроля.

*Примечание. Визуальный и визуально-оптический методы объединяют общим названием "прямой визуальный контроль".*

**Телевизионный метод; непрямой визуально-оптический метод; непрямой визуальный контроль** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на визуальном анализе изображения контролируемого объекта, регистрируемого оптоэлектронными устройствами, средствами фото- и видеотехники.

### Б. Основное оптическое явление (эффект), сопровождающее взаимодействие оптического излучения с объектом контроля

**Дифракционный метод оптического излучения; дифракционный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе дифракционной картины, получаемой при взаимодействии когерентного оптического излучения с объектом контроля.

**Интерференционный метод оптического излучения; интерференционный (интерферометрический) метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе интерференционной картины, получаемой при взаимодействии когерентных волн, опорной и модулированной объектом контроля.

*Примечание. Частные случаи: голографический метод, методы оптической когерентной томографии.*

**Рефракционный (рефрактометрический) метод оптического излучения; рефракционный (рефрактометрический) метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров оптического излучения после его преломления объектом контроля.

**Фазово-контрастный метод оптического излучения; фазово-контрастный метод** — метод неразрушающего контроля, основанный на трансформации разности фаз оптического излучения в различие интенсивности и визуализацию или фоторегистрацию этого контраста.

### В. Вид зондирующего оптического излучения

**Когерентный метод оптического излучения; когерентный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на измерении параметров когерентного оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля.

*Примечание. Частные случаи: метод спекл-интерферометрии, шерография, метод спекл-структур, лазерные методы.*

**Монохроматический метод оптического излучения; оптический метод монохроматического излучения** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на измерении параметров монохроматического оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля.

**Импульсный (импульсно-периодический) метод оптического излучения; импульсный (импульсно-периодический) метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на измерении параметров оптического излучения после воздействия на объект контроля импульсного (импульсно-периодического) оптического излучения.

**Модуляционный метод оптического излучения; модуляционный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе вариации параметров модулированного оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля.





### **Г. Способ обработки (преобразования) оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля**

**Метод фильтрации оптического излучения; метод оптической фильтрации; фильтрационный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе изображения объекта контроля с помощью оптического фильтра.

*Примечание. В зависимости от типа фильтра может осуществлять функцию либо спектральной фильтрации объекта контроля, либо пространственной (угловой) фильтрации изображения объекта — метод согласованной пространственной фильтрации.*

**Стробоскопический метод оптического излучения; стробоскопический метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров оптического излучения в определенные отдельные интервалы времени после его взаимодействия с объектом контроля.

**Многоканальный метод оптического излучения; многоканальный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации и сравнении физических характеристик оптического излучения в разных каналах, различающихся своими параметрами, после его взаимодействия с объектом контроля.

**Дифференциальный метод оптического излучения; дифференциальный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на регистрации различий физических характеристик оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля в разных точках пространства, в разные моменты времени, на разных длинах волн и т.п., либо различий физических характеристик оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля и с контрольным (реперным) образцом — метод разностного оптического изображения.

**Корреляционный метод оптического излучения; корреляционный метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на корреляционном анализе параметров оптического излучения после его взаимодействия с объектом контроля.

### **Д. Способ воздействия на объект контроля**

**Фотохимический метод оптического излучения; фотохимический метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров фотохимических процессов, возникающих при взаимодействии оптического излучения с объектом контроля.

**Оптико-акустический (оптоакустический) метод оптического излучения; оптико-акустический (оптоакустический) метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров оптико-акустического (оптоакустического) эффекта, возникающего при взаимодействии оптического излучения с объектом контроля.

**Электрооптический метод оптического излучения; электрооптический метод** — поляризационный метод оптического неразрушающего контроля, основанный на дополнительном воздействии на объект контроля внешнего электрического поля.

**Магнитооптический метод оптического излучения; магнитооптический метод** — поляризационный метод оптического неразрушающего контроля, основанный на дополнительном воздействии на объект контроля магнитного поля.

**Фотоэлектрический метод оптического излучения; фотоэлектрический метод** — метод оптического неразрушающего контроля, основанный на анализе параметров фотоэлектрических эффектов, возникающих при облучении объекта контроля оптическим излучением.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

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

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

Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.

Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 18.01.2021. Подписано в печать 10.03.2021. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солюшнз". Сайт: [www.aov.ru](http://www.aov.ru)

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.