

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 диагностики 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

2020 Том 21  
7 (240)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Ресурс машин и конструкций

Пушкарёв А.М., Муралев А.А. К вопросу о прогнозировании остаточного ресурса артиллерийского вооружения ..... 291

#### Экономика и организация сборочного производства

Нуждин Г.А., Нуждин М.Г. Интеграция информационных бизнес-систем и систем менеджмента в сборочном производстве ..... 295

#### Современные технологии сборки

Вартанов М.В., Чан Чунг Та. Математическая модель роботизированной сборки при наличии вращения схвата и низкочастотных колебаний ..... 299  
Микаева А.С., Микаева С.А. Сборка контроллера управления ..... 305  
Фот А.П. Сборка гитар станков на основе модернизированных комплектов сменных зубчатых колес ..... 309

#### Сборка с использованием клеев

Захарова М.Э., Васильева П.Ю., Арсенов Н.А. Герметизация ответственных соединений головки блока цилиндров клеевыми составами. . . . 313

#### Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Губарев П.В., Больших И.В., Шабаев В.В. Анализ существующих диагностических комплексов для контроля уровня вибрации узлов локомотивов ..... 318

#### Трение и смазка в машинах и механизмах

Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Пилацкая С.С., Левченко В.А. Исследование влияния характерных смазочных сред на фрикционно-износные характеристики двухслойного покрытия алюминитрида титана + твердый углерод ..... 321  
Эрлих Б.М. Система с двумя степенями свободы в задаче гашения фрикционных колебаний с учетом нелинейностей пассивных сил ..... 325  
Щедрин А.В., Бекаев А.А., Чихачёва Н.Ю. Влияние характеристик поверхностного слоя инструмента и состава технологической смазки на коэффициент трения в методах комбинированного дорнования отверстий .. 331

Председатель редакционного совета  
В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

#### Редакционный совет

##### МОСКВА

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

#### Региональные редсоветы

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

##### ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

##### Украина

##### КИЕВ

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

##### ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

##### Польша

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

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

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.

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

2020 Vol. 21  
7 (240)

### CONTENTS

#### Service life of machinery and constructions

Pushkaryov A.M., Muralev A.A. The question of forecasting residual resource of artillery weapons ..... 291

#### Economy and the organization of assembly

Nuzhdin G.A., Nuzhdin M.G. Integration of information business systems and management systems in assembly production ..... 295

#### Modern technologies in assembly

Vartanov M.V., Tran Trung Ta. Mathematical model of a robotized assembly in the presence of vibrations and gripper rotation ..... 299

Mikaeva A.S., Mikaeva S.A. The assembly of the controller ..... 305

Fot A.P. The assembling of machine tool's change gear quadrants based on modernized sets of gears ..... 309

#### Assembly with use glue

Zakharova M.E., Vasilieva P.Yu., Arsenov N.A. Sealing critical connections of the cylinder head with adhesives ..... 313

#### Quality assurance. Testing. Monitoring

Gubarev P.V., Bol'shikh I.V., Shabaev V.V. Analysis of existing diagnostic systems to control the vibration level of locomotive components ..... 318

#### Friction & lubrication in machines and mechanisms

Buyanovskii I.A., Samusenko V.D., Pilatskaya S.S., Levchenko V.A. The influence of specific lubricants on the friction and wear properties of titanium aluminum nitride + solid carbon two-layer coating investigation ..... 321

Erlich B.M. System with two degrees of freedom in the problem of damping frictional oscillations taking into account nonlinearities of passive forces ..... 325

Shchedrin A.V., Bekaev A.A., Chikhacheva N.Yu. Influence of the characteristics surface layer of the tool and composition technological lubricant on the coefficient of friction in methods combined mandreling of holes ..... 331

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  
E.A. MIKRIN  
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. OSETRV  
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

##### 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. NUZHIDINA, I.M. GLIKMAN

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

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.

**А.М. Пушкарёв**, канд. техн. наук, **А.А. Муралев**, канд. пед. наук  
(Пермский военный институт войск национальной гвардии)  
E-mail: muralev-a@mail.ru

## К вопросу о прогнозировании остаточного ресурса артиллерийского вооружения

*Рассмотрен вопрос прогнозирования технического состояния объекта на примере образцов артиллерийского вооружения. Проанализированы критериальные соотношения исправного состояния объекта. Предложена методика прогнозирования остаточного ресурса изделий вооружения, которая позволяет обоснованно назначать предельный допуск определяющего параметра при длительной эксплуатации изделий.*

*The issue of forecasting the technical condition of the object, on the example of artillery weapons, is considered. The criterial relations of the working condition of the object are analyzed. A methodology for predicting the residual life of weapons products is proposed, which allows you to assign the maximum tolerance of the determining parameter for long-term operation of the products.*

**Ключевые слова:** техническое состояние, случайный процесс, прогнозирование, остаточный ресурс.

**Keywords:** technical condition, random process, forecasting, residual resource.

Практика эксплуатации вооружения и военной техники, в частности образцов артиллерийского вооружения, свидетельствует о том, что их уровень надежности в полной мере отвечает предъявляемым к ним требованиям. Однако в процессе эксплуатации техническое состояние образцов артиллерийского вооружения изменяется. Характер этих изменений зависит от конструктивных особенностей образцов, условий эксплуатации и режимов работы. Усложнение конструкций, ужесточение режимов работы, расширение допустимых температурных диапазонов эксплуатации при одновременном повышении вероятности безотказной работы обуславливают необходимость обоснованного назначения показателей надежности для образцов вооружения. Существующие подходы к назначению показателей долговечности (ресурса и срока службы) образцов артиллерийского вооружения не обеспечивают достижения поставленной цели — нормирования ресурса конструкций.

Наибольший практический интерес представляет нормирование ресурса на основании

прогнозирования потери образцами работоспособности. Прежде чем прогнозировать выработку ресурса образцов и их составных частей, необходимо решить задачу прогнозирования технического состояния объекта.

Каждый образец артиллерийского вооружения характеризуется выходными параметрами, определяющими его качество по показателям. Учитывая назначение изделия и предъявляемые требования к нему, выходные параметры характеризуют разные свойства изделия: экономические, динамические и кинематические показатели, показатели точности функционирования и др. На протяжении всего эксплуатационного цикла изделие подвергается воздействиям динамических и статистических нагрузок, неверным действиям личного состава, эксплуатирующего его, негативным воздействиям окружающей среды. По результатам данных воздействий происходит изменение начальных значений выходных параметров изделия и вследствие этого — потеря ресурса.

Рассмотрим вариант, когда прогнозируется техническое состояние объекта, т.е. отыскива-

ется вероятность исправного состояния объекта в момент прогноза. Используя результаты прогнозирующего контроля, вычислим характеристики случайного априорного процесса, а затем по реализации случайного процесса получили характеристики случайного апостериорного процесса на момент прогноза. Под априорной понимается информация о процессе эксплуатации, известная заранее, т.е. до начала контроля технического состояния объекта. Апостериорная — информация о процессе эксплуатации по данным контроля технического состояния объекта, предсказанная на момент прогноза. Сущность задачи прогноза технического состояния объекта представлена на рис. 1.

Каноническое представление случайного процесса позволяет решать задачу прогнозирования как задачу прогноза технического состояния объекта. Состояние объекта определим параметром  $X$ , изменение которого во времени описывается случайным процессом  $X(t)$  (см. рис. 1). Процесс предполагается статистически определенным на интервале  $T \geq [t_0, t_n]$ . Пусть также определена допусковая область  $[a, b]$ , при нахождении параметра внутри которой объект считается исправным:  $a < X < b$ .

В результате контроля образца на отрезке наблюдения  $\tau_n \leq t_k - t_0$  получена реализация случайного процесса  $x_\mu(t_k, \tau_n)$ , описывающая изменение значений параметра данного образца в интервале  $[t_k - \tau_n, t_k]$ , где  $t_k < t_n$ .

Линия  $l$  на рис. 1 показывает возможные продолжения реализации  $x_\mu(t_k, \tau_n)$  на интервале прогноза  $\tau_n$ . Интервал прогнозирования  $\tau_n$  — случайное время до первого пересечения случайным процессом  $X(t)$  границы поля до-

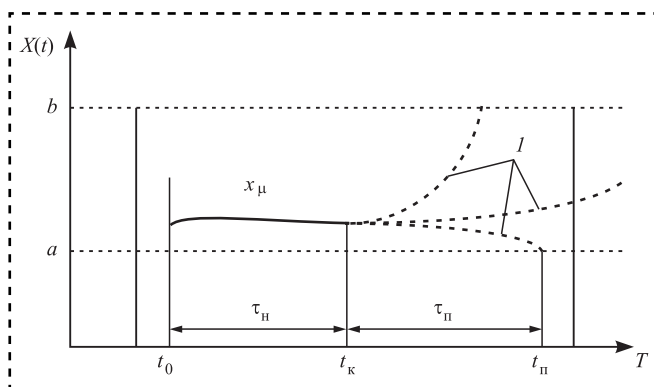


Рис. 1. Схема прогнозирования технического состояния объекта в момент прогноза  $t_n$

пуска после момента  $t_k$  при условии, что до  $t_k$  он находился в поле допуска.

Исчерпывающей характеристикой случайной величины  $\tau_n$  является функция ее распределения  $P\{(T - t_k)/x_\mu(t_k, \tau_n)\}$ , определяющая условную вероятность того, что объект, состояние которого до момента  $t_k$  описывалось реализацией  $x_\mu(t_k, \tau_n)$ , не выйдет из строя до некоторого момента  $T > t_k$ . Эта вероятность является апостериорной вероятностью безотказной работы объекта, которая определяет характеристики случайного апостериорного процесса в сечении  $t_n$ , т.е. работоспособное состояние объекта в моменты времени  $T$  внутри интервала  $t_k < T < t_n$ . Иными словами, апостериорная вероятность безотказной работы объекта показывает, что у объекта заданный параметр  $X$  не выйдет за пределы допуска  $[a, b]$ . При этом прогноз будет тем точнее, чем ближе к  $t_n$  момент  $t_k$ , т.е. чем дольше будет наблюдаться прогнозируемый объект.

Полагая закон распределения случайной величины  $X(t)$  в сечении  $t_n$  нормальным и имея соответствующую плотность вероятности  $f[x(t_n)/x_\mu]$ , искомую вероятность исправного состояния прогнозируемого объекта в момент  $t_n$  вычислим по формуле:

$$P[t_k/x_\mu(t_k, \tau_n)] = \int_a^b f[x(t_n)/x_\mu] dx. \quad (1)$$

Все предшествующее справедливо, когда априорный процесс полностью статистически определен на интервале  $[t_0, t_n]$ .

Рассмотрим методику оценки остаточного ресурса применительно к конструкциям образцов артиллерийского вооружения по имеющимся статистическим данным о случайном процессе.

Уменьшение ресурса образцов артиллерийского вооружения происходит в результате реализации в их конструкции сложных физико-химических процессов, приводящих к коррозии, износу, поломке, деформации и другим видам повреждения деталей. Ресурс образца артиллерийского вооружения определяется и закладывается в технические характеристики образца на этапе его разработки и проектирования и измеряется, как правило, в числе выстрелов (циклов нагружения). Эффективность применения образцов артиллерийского вооружения оценивают при до-

пушении о сохранении живучести их стволов в пределах назначенного ресурса, что не всегда соответствует действительности, вследствие чего происходит ошибочная оценка того или иного исходного параметра. Научное нормирование ресурса образцов артиллерийского вооружения до настоящего времени не проведено и нормативно-правовыми актами не предусмотрено [1]. Эффективное применение изделий артиллерийского вооружения находится в прямой зависимости от условий их эксплуатации, в частности от настрела, который определяют по характеристикам износа канала ствола (совокупность изменений его конфигураций и геометрических размеров) [2].

Определим остаточный ресурс (износ) применительно к конструкциям артиллерийских орудий:

$$T_{\text{ср}} = X_{\text{пр}} - X_{\text{экспл}}, \quad (2)$$

где  $X_{\text{пр}}$ ,  $X_{\text{экспл}}$  — предельный износ ствола и износ ствола, измеренный в процессе эксплуатации соответственно, мм.

С другой стороны, справедливо равенство

$$T_{\text{ср}} = N_{\text{ост}} J_{\text{1в}}, \quad (3)$$

где  $N_{\text{ост}}$  — остаточное (до предельного состояния) число выстрелов;

$J_{\text{1в}}$  — интенсивность изнашивания ствола за один выстрел, мм/выстрел.

Тогда из выражения (2) и (3) следует, что оценить остаточный ресурс (износ) стволов артиллерийских орудий можно по остаточному (до предельного состояния) числу выстрелов:

$$N_{\text{ост}} = \frac{X_{\text{пр}} - X_{\text{экспл}}}{J_{\text{1в}}}. \quad (4)$$

Интенсивность изнашивания ствола за один выстрел  $J_{\text{1в}}$  — апостериорная характеристика, достоверность определения которой во многом зависит от строгости учета настрела артиллерийских орудий [3]. Применительно к конструкциям артиллерийских орудий предложена методика прогнозирования остаточного ресурса, состоящая из следующих этапов (рис. 2):

1. Определение износа ствола в рамках мероприятий технического диагностирования или контрольно-технических осмотров конструкций артиллерийских орудий.

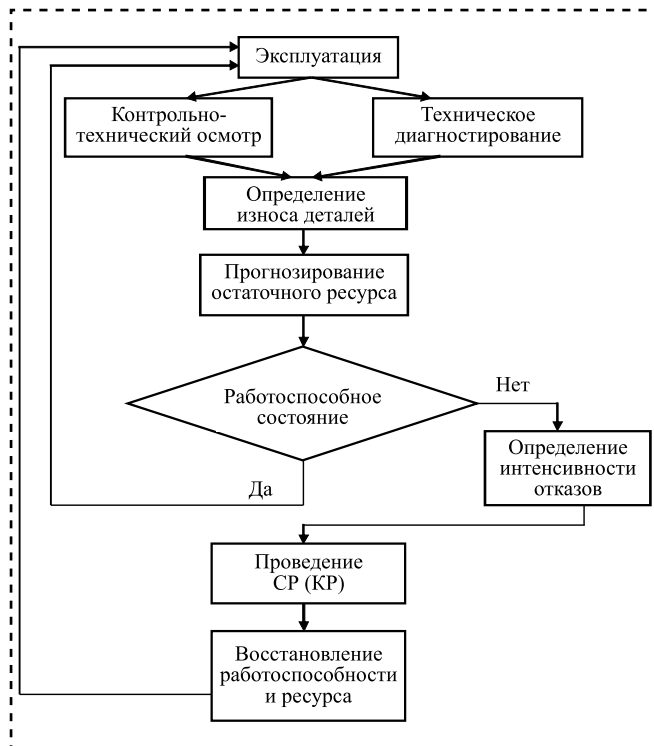


Рис. 2. Блок-схема методики прогнозирования остаточного ресурса артиллерийских орудий

2. Прогнозирование остаточного ресурса стволов артиллерийских орудий с учетом априорной и апостериорной информации о процессе эксплуатации.

3. Определение вида технического состояния артиллерийских орудий.

4. Уточнение информации об интенсивности отказов однотипных конструкций артиллерийских орудий.

5. После установления вида технического состояния артиллерийских орудий принятие решений о проведении их дальнейшей эксплуатации или организации соответствующего вида ремонта.

В процессе эксплуатации вооружения оценку его ресурса проводят на основе нормативной документации, которая в свою очередь основана (явно или неявно) на статистических данных об условиях эксплуатации, воздействиях и материалах изделий вооружения [4]. Прогноз остаточного ресурса образца вооружения в процессе его эксплуатации должен быть основан на вероятностных методах (моделях). Применимо к изделиям, находящимся в эксплуатации, ресурс представляет собой индивидуальный остаточный ресурс (продолжительность эксплуатации от данного момен-

та времени до достижения предельного состояния). Межремонтные периоды при условии эксплуатации по техническому состоянию назначают также индивидуально [5]. Вводится понятие индивидуального ресурса до ближайшего среднего (СР) или капитального (КР) ремонта, в данном случае остаточный ресурс соответствует наработке изделия, которая кратна проведению среднего или капитального ремонта. Например,  $T_H$  (СР) — наработка (ресурс), назначенная до СР;  $T_H$  (КР) — наработка (ресурс), назначенная до КР.

### Заключение

Проблему обеспечения необходимого ресурса образцов артиллерийского вооружения при их эксплуатации можно решить, основываясь на закономерностях (2) — (4) износа ствола от числа выстрелов. Приведенная методика прогнозирования остаточного ресурса изделий артиллерийского вооружения позволяет более обоснованно подготавливать предложения по назначению предельного допуска определяющего параметра при длительной

эксплуатации. В отличие от других известных методик, представленная методика учитывает интенсивность и специфику возникновения отказов в реальных условиях эксплуатации изделий артиллерийского вооружения.

### Библиографический список

1. **Артемов И.И., Савицкий В.Я., Сорокин С.А.** Моделирование изнашивания и прогнозирование ресурса трибосистем. Пенза: Информ.-изд. центр ПГУ, 2004. 373 с.
2. **Эффективность** и надежность стрелково-пушечного вооружения: уч. пособие / А.Г. Шипунов и др. Тула: ТулГУ, 2002. 197 с.
3. **Савицкий В.Я.** Информационная технология прогнозирования ресурса сложных триботехнических систем на стадиях жизненного цикла // Надежность и качество: тр. междунар. симпоз. Пенза: Информ.-изд. центр ПГУ, 2002.
4. **Пушкарев А.М., Вершинин А.А., Вольф И.Г.** Прогнозирование износа артиллерийских стволов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 12-1. С. 13—17.
5. **Муралев А.А., Хамов А.А.** Анализ технологической схемы технического обслуживания вооружения // Сб. ст. V Всерос. науч.-практич. конф. "Калашниковские чтения". Ижевск: ИЖГТУ, 2018. С. 388—393.



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, www.mashin.ru

Г.А. Нуждин, канд. техн. наук, М.Г. Нуждин

(Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС")

E-mail: nuzhdin.65@mail.ru

## Интеграция информационных бизнес-систем и систем менеджмента в сборочном производстве

*Представлены вопросы реализации "Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы" в части внедрения информационных бизнес-систем и их интеграции с системами менеджмента промышленных предприятий. Рассмотрены модули-компоненты APS-системы, ее возможности и ограничения в плане внедрения в сборочное производство. Отмечена особая актуальность и необходимость интеграции с функционирующими системами ERP и системами менеджмента в целях обеспечения системного подхода и результативности деятельности.*

*Issues of the implementation of the "Strategy for the Development of the Information Society in the Russian Federation for 2017–2030" in terms of the implementation of information business systems and their integration with management systems of industrial enterprises are presented. The module components of the APS system, its capabilities and limitations in terms of implementation in an industrial enterprise are considered. The special relevance and necessity of integration with functioning ERP systems and management systems in order to ensure a systematic approach and performance was noted.*

**Ключевые слова:** информационная бизнес-система, производственное и прогнозное планирование, организация производства, система менеджмента.

**Keywords:** business information system, production and forecast planning, production organization, management system.

По мере реализации "Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017–2030 годы" одна из коммерческих задач промышленного предприятия по извлечению прибыли не всегда имеет простое однозначное решение на этапе планирования даже с использованием математических моделей оптимизации прибыли и методов линейного математического программирования. Апробация таких математических моделей на ряде сборочных предприятий показала, что для большой доли вариантов по оптимизации внутренних цепочек поставок в них возникает необходимость решения задачи оптимизации очень большой размерности. Поэтому можно прогнозировать положительный результат использования платформ для решения задач большой размерности.

Из-за необходимости соответствия изменяющимся требованиям к производственному планированию и его основным принципам исследо-

вания и разработки привели к созданию систем APS. Это узкоспециализированные системы производственного планирования, которые сохранили один из главных моментов — нацеленность на более полное удовлетворение потребностей заказчиков, не забывая внутренних потребителей. Например, утвержденная Советом директоров производственного предприятия уровневая структура планирования производства представляет собой интегральную композицию стратегического планирования и связанных наборов целей и задач [1, 5, 6]. Выполняют же их различные подразделения организации, соответственно, и с различными выделенными ресурсами и ответственностью за результат. Все это в условиях ограниченности ресурсов вынужденно приводит к разработке отдельных модулей не только для каждого уровня управления, но и для каждого вида экономической деятельности предприятия.

APS (Advanced Planning & Scheduling) в дословном переводе — расширенное усовершен-

ствованное планирование. Одно из главных его преимуществ — ускоренное по сравнению с прототипами производственное планирование, синхронизированное с быстрым учетом имеющихся ресурсов, уже выполняющихся производственных планов и связанных с этих ограничений по переналадке оборудования, готовности оснастки, и др. Эти возможности обеспечиваются заранее составленными схемами взаимодействия и сценариями оптимизации. Концепция APS совмещает в себе основные элементы Material Requirements Planning (MRP), Manufacturing Resource Planning (MRP II), Finite Capacity Scheduling (FCS).

В целях уточнения применимости APS-систем к организации сборочного производства поставили задачу выявления возможностей и ограничений при ее внедрении механизма планирования на основе интегрирования математических моделей и систем менеджмента.

Для результативного использования APS-системы необходимо выполнение ряда условий. Это наличие базовой системы для работы с основными данными на уровне предприятия (Enterprise Resource Planning — планирование ресурсов предприятия — ERP-системы) и обученного персонала. Желательно иметь функционирующую систему менеджмента, систему подготовки, переподготовки и повышения квалификации персонала. Еще полезнее, если на предприятии внедрена интегрированная система менеджмента [2]. При выполнении этих условий APS-система получает из ERP-системы основные параметры, включая информацию о производственных мощностях в квартальной и ежемесячной разбивке, оперативные данные планирования, ожидаемое время возобновления запасов. APS-система не заменяет ERP-систему, а дополняет имеющийся функционал в части оптимизации производственных процессов. Это можно представить как процесс, где, интегрируя данные из ERP-системы, APS-система способствует формированию нового уровня планирования производства.

APS-система для производственного предприятия обычно содержит основные модули-компоненты: Sales and Demand Forecasting (прогнозирование сбыта и спроса), Master Production Scheduling & Rough-Cut Capacity Planning (основной производственный план и общее планирование загрузки производственных мощностей), Finite Capacity Scheduling (детальное планирование загрузки производственных мощностей).

*Модуль оперативного прогнозирования сбыта и спроса Sales and Demand Forecasting (SDF)* обрабатывает и обобщает сведения по ожидаемым пользователем изменениям рынка, включая

и изменение важных условий по цепочке поставщиков. Также обрабатываются и прогнозы, сгенерированные на основе сохраненной за определенный период времени "статистической истории" спроса. С помощью результатов работы SDF-модуля можно в заданном режиме отслеживать сравнительное состояние запасов товарно-материальных ценностей и параметры их пополнения по каждой единице номенклатуры продукции в каждом складском месте. Планирование закупок сырья и вспомогательных материалов осуществляют параллельно и одновременно с учетом изменяющихся ограничений производственных мощностей и человеческих ресурсов, что положительно влияет на ускорение и достижение результата процедуры.

*Модуль Master Production Scheduling (MPS)* — основной производственный план анализирует и обчисляет различные варианты сценариев действий, разрабатывая проект производственного плана, максимально предпочтительный потребностям как текущего портфеля заказов, так и прогнозируемого объема продаж с учетом возможных колебаний рынка, электронных торгов и доступных в сжатые сроки ресурсов предприятия. APS-системы в большинстве модификаций направлены и ориентированы на производство продукции по типу "сборка на заказ" после предоплаты или по типу "производство на склад" с постоплатой, и они способны учитывать специфику многих типов производства, включая, например, разработку и производство оборудования и источников гамма-излучения для промышленной радиографии АО "Энергомонтаж Интернэшнл", г. Москва (АО "ЭМИ").

*Модуль Rough Cut Capacity Planning (RCCP)* — общее планирование загрузки мощностей интегрирует данные предыдущих модулей MPS в целях проектирования обобщенных планов загрузки производственных мощностей на основании стандартной обработки полученной информации, а также позволяет просматривать соответствующие "срезы" плановых потребностей в сырье и ресурсах и сопоставлять их с текущими финансовыми и/или складскими ограничениями. В результате возможно выявить большую часть групп критических ресурсов и сырья, включая наличие рабочей силы, полностью готового оборудования, бесперебойного снабжения энергоресурсами, материалами и складские помещения. При возникновении нестыковок модуль сравнивает альтернативные модели календарных и сетевых графиков в целях достижения необходимого уровня использования "критических" ресурсов при реализации моделируемого плана. APS-системы имеют техническую возможность поддерживать





распределенное планирование, когда несколько человек с установленными правами и границами доступа к конфиденциальной информации могут планировать одновременно и фиксировать соответствующие уровни персональной ответственности за определенные зоны и участки планирования.

*Модуль Finite Capacity Scheduling (FCS)* — детальное планирование загрузки производственных мощностей при грамотной загрузке полного объема реальных сведений с учетом динамики просчитывает варианты состояний, из которых формирует заданный набор календарных и сетевых графиков в соответствии с заданными сведениями по доступности человеческих ресурсов, свободного оборудования в состоянии полной готовности, сырья, оснастки и инструментов, и объемов складских помещений и хранилищ. Возможности APS-систем по оптимизации закладываются на этапе их проектирования с использованием методов оценки, контроля и управления рисками [3, 4, 7] и/или сложных математических моделей, которые, разумеется, различаются для конкретной отрасли, так же как и для конкретных предприятий. Лучше, если APS-системы в работе находятся на техническом сопровождении, чтобы текущую тонкую поднастройку алгоритмов оптимизации осуществляли сразу и непосредственно сами пользователи с правом доступа от руководства предприятия.

APS-системы в основном позволяют пользователям производственных предприятий осуществлять прогнозное планирование с кратностью в неделю, месяц и далее, но в пределах, не превышающих срок до трех лет, так как это максимальный срок действия любого сертификата соответствия [3, 5]. Возможна корректировка прогнозного плана на уровне редактирования числовых данных и с помощью мыши в графическом представлении. В зависимости от аппаратного и программного обеспечения поддерживается многоуровневая агрегация с волновым сглаживанием, обеспечивающая прогнозирование сверху-вниз, снизу-вверх и от середины в обе стороны, с соответствующим заданным множеством потоков: отгрузки, утерянных заказов, каналов возврата товаров и розничной продажи при неограниченном числе определяемых пользователем единиц измерения. Все это может быть осуществимо с учетом характера жизненного цикла продукта, периодов освоения новых продуктов и плановых дат снятия с производства старых. В целях повышения достоверности планирования мероприятий по продвижению продуктов на рынок предусмотрено множество алгоритмов и параметров расчета и отслеживания материально-производственных потоков и событий в контрольных точ-

ках производства, пополнения, учета и прогнозирования запасов. Для проведения текущего или промежуточного анализа контроль за исполнением и корректирующие или предупреждающие уведомления сохраняются и в графическом формате и в виде отчетов благодаря поддержке веб-ориентированных технологий, обеспечивающих в числе прочего удаленную работу (визуализация, ввод дополнений или изменений, просмотр отчетов).

Одно из главных преимуществ APS-систем раскрывается при функционировании на предприятии интегрированной системы менеджмента в существующей информационной среде предприятия. В этом случае наиболее полно реализуется мощный инструмент визуализации и генератора отчетов в любом пользовательском "срезе". Пользователи получают и удобные средства анализа плановой информации — различные графики, диаграммы (например, интерактивная диаграмма Ганта, графики планово-предупредительного ремонта оборудования и машин, складских запасов и ресурсов, объема незавершенного производства и т.п.), и широкий набор встроенных полнопараметрических отчетов. APS-системы безошибочно работают как отдельно, так и совместно с интегрированными системами менеджмента [2]. Поэтому согласование плановых аудитов, проверок и прогнозных планов потребностей в материалах и производственных мощностях происходит одновременно. Алгоритмы работы APS-системы осуществляют текущий подсчет запасов и расчет необходимых к закупке и производству изделий синхронно с учетом существующих ограничений по человеческим ресурсам и готовности оборудования мощностей. Одна из главных задач процесса планирования — создание реалистичного плана, реализуемого с прибылью для предприятия. Детализация и точность модели производства и цепочек поставок находятся на высоком уровне зависимости от человеческого фактора, от аккуратности моделирования, от, например, лицензионных ограничений производства и, конечно, от самой цепочки поставок. Модель данных APS-системы учитывает при планировании детальные характеристики конкретных единиц оборудования, наличие и полноту кадрового резерва, степень износа и возраст транспортно-средств, цифровизацию технологических маршрутов и т.д. Важная характеристика APS-системы — скорость, которая достигается адекватным решаемым задачам аппаратным и программным обеспечением и сохранением всей модели данных в оперативной памяти сервера, позволяя оперативно перепланировать и быстро реагировать на различные изменения в законодательном и рыночном регули-

ровании в цепи поставок. Широкое использование коллективной работы внешних и внутренних участников в единой многопользовательской среде под строгим контролем службы защиты информационной системы обеспечивает сотрудничество пользователей APS-системы и ее приложений, даже если приложения веб-ориентированы, и согласование планов между различными подразделениями внутри предприятия и с другими участниками процесса за его пределами.

Обязательное наличие и соблюдение высоких требований к точности исходной информации для применения APS-системы требует наличия обученных сотрудников, поддерживающих функции мощной ERP-системы, которая, в свою очередь, результативно выполняет синхронное прогнозное планирование и, кроме того, интегрирована в систему менеджмента и с остальными модулями корпоративной информационной системы [2]. APS-система объективно служит надстройкой ERP-системы, органично расширяя, но не подменяя и не заменяя функциональность в части планирования. Многолетне отлаженная архитектура ERP-решений не рассчитана на резко возросшие в ходе реализации "Стратегии развития информационного общества в Российской Федерации на 2017—2030 годы" объемы вычислений над пропорционально увеличившимися исходными данными. APS-система обрабатывает и использует информацию, содержащуюся в транзакционной части функционирующей ERP-системы. Это история участия в госзакупках, электронных торгах, история продаж, информация об обращениях и о фактических заказах клиентов, актуальные сведения об остатках товаров на складах и др. По завершении процесса планирования APS-система передает обусловленные системным разрешением соответствующие протоколы (заказы на производство, закупку и перемещение, прогнозы) в ERP-систему.

### Заключение

Гибкие производственные системы сборочного производства квалифицируются динамичной корректировкой планов производства вне зависимости от коэффициента закрепления операций, характеризующего типичное мелкосерийное, единичное или массовое производство. Контур диспетчирования имеется не у всех APS-систем, а частота перепланирования в APS-системе обусловлена в том числе частотой появления новых заказов, потому что обратная связь в режиме реального времени для APS-системы избыточна. Для создания более производительного и точного контура обратной связи с производством системные интеграторы—поставщики APS-

систем используют интеграцию с MES-системами (Manufacturing Execution System — система управления производственными процессами). Горизонт планирования в APS-системах редко бывает однозначным. Однако для APS-систем он определяется исходя из основной задачи, функционала системы, которым является управление цепочками поставок. Длительность горизонта планирования в APS-системах — это разница во времени между моментами выдачи наиболее дальних заказов из всего портфеля предприятия и текущей датой. Возможности, обусловленные необходимостью управления цепочками поставок, одна из причин того, что темпы роста внедрения APS-систем в промышленности значительно опережают темпы роста решений в ERP-системе. Поэтому существует потребность интеграции на уровне ядра планирования ERP-системы, которое может быть заменено APS-системой. В то же время APS может поставляться как отдельный продукт, учитывающий специфику "сборки под заказ", планировать непрерывное производство, и применяться к различным средам планирования. Цель систем класса APS — объединение цепочки поставщиков и потребителей для достижения максимальной прибыли и лучшего удовлетворения требований рынка за счет усовершенствованного планирования на базе информационных технологий.

### Библиографический список

1. **Нуждин Г.А., Самошкин Ю.А., Ляпина Г.И.** Процессный подход к менеджменту качества: стратегическое планирование // Справочник. Инженерный журнал. 2005. № 6. С. 26—29.
2. **Интеграция** систем менеджмента на металлургическом предприятии (на примере ООО "МеталЛит-Маш") / Г.А. Нуждин, Г.И. Ляпина, Ю.А. Самошкин и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 10. С. 42—47.
3. **Нуждин Г.А., Самошкин Ю.А.** Оценка риска при сертификации // Справочник. Инженерный журнал. 2012. № 3. С. 33—36.
4. **Нуждин Г.А., Самошкин Ю.А., Введенский В.Ю.** Контроль качества и рисков в производстве оборудования неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2016. № 11. С. 50—54.
5. **Актуальные** вопросы внедрения и сертификации системы менеджмента качества / Г.А. Нуждин, Г.И. Ляпина и др. // Экономика в промышленности. 2009. № 3. С. 52—56.
6. **Вопросы** внедрения системы менеджмента качества предприятия / Г.А. Нуждин, Г.И. Ляпина и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 12. С. 49—52.
7. **Управление** рисками в организационно-технических мероприятиях по обеспечению качества на объектах использования атомной энергии / В.Ш. Плеханов, Ю.А. Самошкин и др. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 6. С. 435—441.

**М.В. Вартанов**, д-р техн. наук, Чан Чунг Та  
(Московский политехнический университет)  
E-mail: m.v.vartanov@mospolytech.ru, trungta82@gmail.com

## Математическая модель роботизированной сборки при наличии вращения схвата и низкочастотных колебаний

*Рассмотрен метод сборки с использованием эффекта вращательного движения и вибраций. Наличие вращения позволяет значительно уменьшить силу трения при сопряжении, которая препятствует сборке. Эффект достигается за счет использования вращения схвата робота или вибрационного устройства. Представлена математическая модель динамики процесса роботизированной сборки.*

*The assembly method using the effect of rotational motion and vibration is considered. The presence of rotation allows to significantly reducing the friction force in connection, which prevents the assembly process. The effect is achieved due to using the rotation of robot gripper and the vibrating device. A mathematical dynamics model of the robotic assembly process is presented.*

**Ключевые слова:** математическая модель динамики сопряжения, роботизированная сборка, эффект вращения, цилиндрические сопряжения, низкочастотные колебания.

**Keywords:** mathematical dynamics model of connection, robotic assembly, effect rotation, cylindrical joint, low frequency oscillations.

### Введение

Сборочные задачи с использованием промышленных роботов постоянно усложняются. Основная проблема — заклинивание даже при небольших перекосах, особенно при сопоставимости величины зазора в соединении и погрешности позиционирования робота. В случае, когда зазор сопоставим с погрешностью формы, сборка на основе жесткого базирования становится невозможной.

Один из путей повышения эффективности сборки, особенно при наличии малых зазоров в соединении, — различные способы уменьшения силы трения в зоне сопряжения. Вращательное движение устанавливаемой детали может обеспечить достижение данного эффекта [1–5].

Кинематические и динамические проблемы автоматической сборки с использованием эффекта вращательного движения обычно рассматриваются для сборки только на основе "жесткого" базирования [6, 7].

Применение низкочастотных колебаний остается одним из наиболее перспективных направлений в области автоматической сборки [2, 8–11].

### Математическая модель процесса сборки

*Метод роботизированной сборки цилиндрических соединений при наличии вибраций и вращения схвата*

Построена динамическая модель процесса сборки цилиндрического соединения с применением промышленного робота типа ABB IRB-140 и виброопоры. Схват робота совершает в процессе сопряжения деталей вращательное движение вокруг своей вертикальной оси, совпадающей с осью вращения выходного звена робота.

Виброопора имеет возможность колебаний относительно взаимоперпендикулярных горизонтальных осей и вращения вокруг вертикальной оси.

Введено три системы координат с общим началом в точке  $O$ :  $OXYZ$  — неподвижная;  $OX_1Y_1Z_1$  и  $O\xi\eta\zeta$  — жестко связанные соответственно с первым 1 и вторым 2 звеном вибрационного устройства (рис. 1). Со вторым звеном жестко связан вибрационный диск 3, в центре которого находится базовое отверстие с жестко закрепленной втулкой.

При этом вибрационные колебания вокруг взаимно-перпендикулярных осей  $OY_1$ ,  $O\xi$  происходят по законам:

$$\begin{aligned} \psi &= A \sin kt; \\ \varphi &= A \cos kt, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда колебаний;

$k$  — круговая частота.

Цилиндрический вал зажат в схвате робота и имеет возможность перемещения вертикально вниз.

Рассмотрим случай, когда первоначальный контакт детали с плоскостью вибрационного диска (втулки) произойдет в одной точке (рис. 2). Предположим, что угол перекося осей сопрягаемых деталей настолько мал, что им можно пренебречь. Система координат  $CX_2Y_2Z_2$  жестко связана с валом, начало координат системы совпадает с центром масс вала.

Цель работы — изучить влияние низкочастотных колебаний и вращения на характер движения центра масс детали по отношению ко втулке (т.е. по отношению к подвижной системе координат  $O\xi\eta\zeta$ ). Необходимо определить влияние на характер движения центра масс детали ряда параметров: конструктивного параметра  $h$  вибрационного устройства;

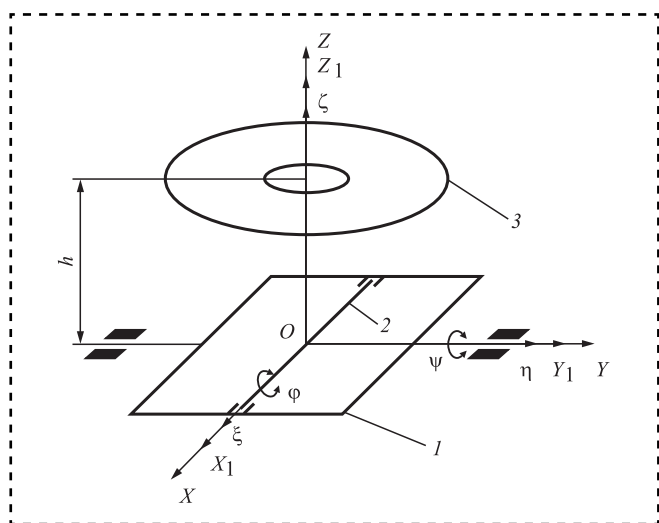


Рис. 1. Кинематическая схема вибрационного устройства

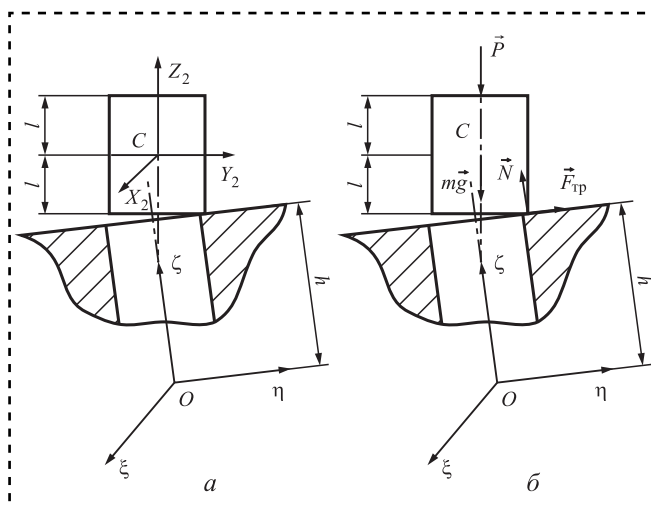


Рис. 2. Схема первоначального контакта вала с вибрирующим диском (а) и распределение сил при одноточечном контакте (б)

коэффициента трения между устанавливаемой деталью и втулкой  $f$ ; амплитуды  $A$  и круговой частоты  $k$  вибрационных колебаний, а также угловой скорости вращения опоры  $\omega$ .

Для этого необходимо получить дифференциальные уравнения движения центра масс цилиндрической детали по отношению к подвижной (неинерциальной) системе координат  $O\xi\eta\zeta$ .

### Математическая модель динамики относительного движения центра масс устанавливаемой детали

На основании теоремы о движении центра масс системы для абсолютного движения цилиндрической детали при наличии ее контакта с поверхностью вибрационного диска получим:

$$m\vec{a}_c = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{P}, \quad (2)$$

где  $m$  — масса цилиндрической детали;

$\vec{a}_c$  — абсолютное ускорение центра масс цилиндрической детали;

$\vec{g}$  — ускорение свободного падения;

$\vec{N}$  — нормальная реакция плоскости ориентирующего диска;

$\vec{F}_{\text{тр}}$  — сила трения скольжения;

$\vec{P}$  — сборочная сила, развиваемая приводом робота.

Дифференциальное уравнение относительного движения центра масс детали (по отношению ко втулке) в векторной форме имеет вид:

$$m\vec{a}_{cr} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_{ce}^{\text{ин}} + \vec{F}_{ck}^{\text{ин}} + \vec{P}, \quad (3)$$



где  $\vec{F}_{ce}^{ин}$  — переносная сила инерции центра масс детали;

$\vec{F}_{ck}^{ин}$  — кориолисова сила инерции центра масс детали.

Дифференциальное уравнение (3) представим в проекциях на оси подвижной системы координат  $O\xi\eta\zeta$ , жестко связанной с втулкой:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi}_c &= (m\bar{g})_{\xi} + F_{тр\xi} + F_{ce\xi}^{ин} + F_{ck\xi}^{ин} + P_{\xi}; \quad m\dot{\eta}_c = (m\bar{g})_{\eta} + F_{тр\eta} + F_{ce\eta}^{ин} + F_{ck\eta}^{ин} + P_{\eta}; \\ m\ddot{\zeta}_c &= (m\bar{g})_{\zeta} + F_{ce\zeta}^{ин} + F_{ck\zeta}^{ин} + N + P_{\zeta}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\xi_c, \eta_c, \zeta_c$  — координаты центра масс детали (точка  $C$ ) в системе координат  $O\xi\eta\zeta$ .

Для определения проекций всех сил на подвижные оси координат  $O\xi\eta\zeta$  применяли аппарат матриц преобразования однородных координат [12]. В результате построили матрицу, определяющую положение схвата и цилиндрической детали (система координат  $CX_2Y_2Z_2$  относительно втулки  $O\xi\eta\zeta$ ):

$$[B_{\sigma}] = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -c\psi s\theta & -s\psi & -s\psi z_{c4} \\ s\psi s\varphi c\theta + c\varphi c\theta & -s\psi s\varphi s\theta + c\varphi c\theta & c\psi s\varphi & c\psi s\varphi z_{c4} \\ s\psi c\varphi c\theta - s\varphi c\theta & -s\psi c\varphi s\theta - s\varphi c\theta & c\psi c\varphi & c\psi c\varphi x_{c4} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $s\psi = \sin\psi$ ;  $c\psi = \cos\psi$ ;  $s\varphi = \sin\varphi$ ;  $c\varphi = \cos\varphi$ ;  $s\theta = \sin\theta$ ;  $c\theta = \cos\theta$ .

Для определения проекций силы трения на оси системы координат  $O\xi\eta\zeta$  необходимо найти скорость точки касания цилиндрической детали с плоскостью втулки (точки  $K$ ) по отношению к системе координат  $O\xi\eta\zeta$ . Сила трения направлена противоположно скорости точки  $K$ . Найдем уравнения движения точки касания в декартовых координатах.

Координаты точки  $K$  в системе координат  $O\xi\eta\zeta$  можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} \xi_k &= -r \cos\psi \sin\theta + l \sin\psi + \xi_c; \\ \eta_k &= r(-\sin\psi \sin\varphi \sin\theta + \cos\varphi \cos\theta) - l \cos\psi \sin\varphi + \eta_c; \\ \zeta_k &= r(-\sin\psi \cos\varphi \sin\theta - \sin\varphi \cos\theta) - l \cos\psi \cos\varphi + \zeta_c. \end{aligned} \quad (6)$$

Для определения проекций переносной силы инерции центра масс детали  $\vec{F}_{ce}^{ин}$  на оси системы координат  $O\xi\eta\zeta$  найдем проекции на эти оси переносного ускорения центра масс. Для этого определим координаты в неподвижной системе координат  $OXYZ$  той точки системы координат  $O\xi\eta\zeta$ , с которой в данный момент совпал центр масс детали:

$$\begin{aligned} x_c &= \cos\psi \xi_c + \sin\psi \sin\varphi \eta_c + \sin\psi \cos\varphi \zeta_c; \quad y_c = \cos\varphi \eta_c - \sin\varphi \zeta_c; \\ z_c &= -\sin\psi \xi_c + \cos\psi \sin\varphi \eta_c + \cos\psi \cos\varphi \zeta_c. \end{aligned} \quad (7)$$

Определим проекции переносного ускорения центра масс детали на оси неподвижной системы координат:

$$a_{cex}\ddot{x}_c; \quad a_{cey} = \ddot{y}_c; \quad a_{cez} = \ddot{z}_c. \quad (8)$$

В результате подстановки в выражение (7) соотношений (8) получим:

$$\begin{aligned} a_{cex} &= (-\cos\psi \xi_c - \sin\psi \sin\varphi \eta_c - \sin\psi \cos\varphi \zeta_c) \ddot{\psi}^2 + (-\sin\psi \sin\varphi \eta_c - \sin\psi \cos\varphi \zeta_c) \dot{\psi}^2 - \\ &\quad - (\sin\psi \xi_c - \cos\psi \sin\varphi \eta_c - \cos\psi \cos\varphi \zeta_c) \ddot{\psi} + (\sin\psi \cos\varphi \eta_c - \sin\psi \sin\varphi \zeta_c) \dot{\psi} + \\ &\quad + 2(\cos\psi \cos\varphi \eta_c - \cos\psi \sin\varphi \zeta_c) \dot{\psi} \dot{\psi}; \\ a_{cey} &= (-\cos\varphi \eta_c + \sin\varphi \zeta_c) \dot{\psi}^2 (-\sin\varphi \eta_c - \cos\varphi \zeta_c) \dot{\psi}; \\ a_{cez} &= (\sin\psi \xi_c - \cos\psi \sin\varphi \eta_c - \cos\psi \cos\varphi \zeta_c) \ddot{\psi}^2 + (-\cos\psi \sin\varphi \eta_c - \cos\psi \cos\varphi \zeta_c) \dot{\psi}^2 - \\ &\quad - (\cos\psi \xi_c + \sin\psi \sin\varphi \eta_c + \sin\psi \cos\varphi \zeta_c) \ddot{\psi} + (\cos\psi \cos\varphi \eta_c - \cos\psi \sin\varphi \zeta_c) \dot{\psi} + \\ &\quad + 2(-\sin\psi \cos\varphi \eta_c + \sin\psi \sin\varphi \zeta_c) \dot{\psi} \dot{\psi}. \end{aligned} \quad (9)$$

Проекция переносного ускорения центра масс цилиндрической детали на оси системы координат  $O\xi\eta\zeta$  найдем по формулам:

$$\begin{aligned} a_{ce\xi} &= \cos \psi a_{cex} - \sin \psi a_{cez}; \\ a_{ce\eta} &= \sin \psi \sin \varphi a_{cex} + \cos \varphi a_{cey} + \cos \psi \sin \varphi a_{cez}; \\ a_{ce\zeta} &= \sin \psi \cos \varphi a_{cex} - \sin \varphi a_{cey} + \cos \psi \cos \varphi a_{cez}. \end{aligned} \quad (10)$$

Проекция переносной силы инерции центра масс цилиндрической детали на оси системы координат  $O\xi\eta\zeta$ :

$$\begin{aligned} F_{ce\xi}^{ин} &= m [\cos \psi a_{cex} - \sin \psi a_{cez}]; \\ F_{ce\eta}^{ин} &= m [\sin \psi \sin \varphi a_{cex} + \cos \varphi a_{cey} + \cos \psi \sin \varphi a_{cez}]; \\ F_{ce\zeta}^{ин} &= m [\sin \psi \cos \varphi a_{cex} - \sin \varphi a_{cey} + \cos \psi \cos \varphi a_{cez}]. \end{aligned} \quad (11)$$

Проекция кориолисовой силы инерции центра масс детали на оси системы координат  $O\xi\eta\zeta$  примет вид:

$$\begin{aligned} F_{ck\xi}^{ин} &= -2m\dot{\zeta}_c (\dot{\psi} \cos \varphi + \omega \cos \psi \sin \varphi) + 2m\dot{\eta}_c (-\dot{\psi} \sin \varphi + \omega \cos \psi \cos \varphi); \\ F_{ck\eta}^{ин} &= -2m\dot{\xi}_c (-\dot{\psi} \sin \varphi + \omega \cos \psi \cos \varphi) + 2m\dot{\zeta}_c (\dot{\varphi} - \omega \sin \psi); \\ F_{ck\zeta}^{ин} &= -2m\dot{\eta}_c (\dot{\varphi} - \omega \sin \psi) + 2m\dot{\xi}_c (\dot{\psi} \cos \varphi + \omega \cos \psi \sin \varphi). \end{aligned} \quad (12)$$

Проекция сборочной силы  $\bar{P}$  на оси системы координат  $O\xi\eta\zeta$  определим на основе соотношений:

$$\begin{aligned} P_\xi &= p \sin \psi; \\ P_\eta &= -p \cos \psi \sin \varphi; \\ P_\zeta &= -p \cos \psi \cos \varphi. \end{aligned} \quad (13)$$

Математическая модель динамики относительного движения центра масс цилиндрической детали при наличии одноточечного ее контакта с плоскостью ориентирующего диска (с плоскостью втулки) может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi}_c &= p \sin \psi - fN \frac{\dot{\xi}_k}{\sqrt{\dot{\xi}_k^2 + \dot{\eta}_k^2 + \dot{\zeta}_k^2}} + m (\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \dot{\psi} \sin \varphi - 2\eta_c \dot{\varphi} \dot{\psi} \cos \varphi - 2\eta_c \omega \dot{\varphi} \sin \varphi - \zeta_c \dot{\psi} \cos \varphi + \\ &+ 2\zeta_c \dot{\varphi} \dot{\psi} \sin \varphi - 2\zeta_c \omega \dot{\varphi} \cos \varphi \cos \psi + \xi_c \omega^2 \cos^2 \varphi + \eta_c \omega^2 \sin \psi \sin \varphi \cos \psi + \zeta_c \omega^2 \sin \psi \cos \varphi \cos \psi) - \\ &- 2m\dot{\zeta}_c (\dot{\psi} \cos \varphi + \omega \cos \psi \sin \varphi) + 2m\dot{\eta}_c (-\dot{\psi} \sin \varphi + \omega \cos \psi \cos \varphi); \\ m\ddot{\eta}_c &= -p \cos \psi \sin \varphi - fN \frac{\dot{\eta}_k}{\sqrt{\dot{\xi}_k^2 + \dot{\eta}_k^2 + \dot{\zeta}_k^2}} + m (\xi_c \dot{\psi} \sin \varphi + \eta_c \dot{\psi}^2 \sin^2 \varphi + \eta_c \dot{\varphi}^2 - \\ &- 2\eta_c \omega \dot{\varphi} \sin \psi + \zeta_c \dot{\psi}^2 \cos \varphi \sin \varphi + \xi_c \omega^2 \sin \psi \cos \psi \sin \varphi + \zeta_c \dot{\varphi} + \\ &+ \eta_c \omega^2 \sin^2 \varphi \sin^2 \psi + \zeta_c \omega^2 \sin^2 \psi \sin \varphi \cos \varphi + 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \sin \psi \cos \varphi - \\ &- 2\eta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \sin \varphi \cos \varphi - 2\zeta_c \omega \dot{\psi} \cos \psi \cos^2 \varphi + \eta_c \omega^2 \cos^2 \varphi - \zeta_c \omega^2 \sin \varphi \cos \varphi) - \\ &- 2m\dot{\xi}_c (-\dot{\psi} \sin \varphi + \omega \cos \psi \cos \varphi) + 2m\dot{\zeta}_c (\dot{\varphi} - \omega \sin \psi). \end{aligned} \quad (14)$$



При этом нормальная реакция  $N$  плоскости вибрационного диска имеет вид:

$$\begin{aligned}
 N = m\ddot{\zeta}_c - m(\xi_c\omega^2 \cos \psi \sin \psi \cos \varphi + \eta_c\omega^2 \sin^2 \psi \sin \varphi \cos \varphi - \eta_c\omega^2 \sin \varphi \cos \varphi + \\
 + \zeta_c\omega^2 \sin^2 \psi \cos^2 \varphi + \zeta_c\omega^2 \sin^2 \varphi - 2\zeta_c\omega\dot{\varphi} \sin \psi + \xi_c\ddot{\psi} \cos \varphi + \eta_c\dot{\psi}^2 \sin \varphi \cos \varphi - \eta_c\ddot{\varphi} + \\
 + \zeta_c\dot{\psi}^2 \cos^2 \varphi + \zeta_c\dot{\varphi}^2 - 2\xi_c\omega\dot{\psi} \sin \psi \sin \varphi + 2\eta_c\omega\dot{\psi} \cos \psi \sin^2 \varphi + 2\zeta_c\omega\dot{\psi} \cos \psi \sin \varphi \cos \varphi) + \\
 + 2m\dot{\eta}_c(\dot{\varphi} - \omega \sin \psi) - 2m\dot{\xi}_c(\dot{\psi} \cos \varphi + \omega \cos \psi \sin \varphi) + p \cos \psi \cos \varphi.
 \end{aligned} \quad (15)$$

В момент отрыва цилиндрической детали от плоскости вибрационного диска нормальная реакция плоскости  $N$  и сила трения  $F_{\text{тр}}$  равны нулю. Момент отрыва детали от плоскости вибрационного диска определили на основании условия обнуления нормальной реакции  $N$ . Таким образом, дифференциальные уравнения относительного движения центра масс детали при отсутствии ее контакта с плоскостью вибрационного диска получим в виде:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{\xi}_c &= F_{ce\xi}^{\text{ИИ}} + F_{ck\xi}^{\text{ИИ}} + P_\xi; \\
 m\ddot{\eta}_c &= F_{ce\eta}^{\text{ИИ}} + F_{ck\eta}^{\text{ИИ}} + P_\eta; \\
 m\ddot{\zeta}_c &= F_{ce\zeta}^{\text{ИИ}} + F_{ck\zeta}^{\text{ИИ}} + P_\zeta.
 \end{aligned} \quad (16)$$

В результате получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 m\ddot{\xi}_c &= m[\xi_c\dot{\psi}^2 - \eta_c\dot{\psi} \sin \varphi - 2\eta_c\dot{\varphi}\dot{\psi} \cos \varphi - 2\eta_c\omega\dot{\varphi} \sin \varphi - \zeta_c\dot{\psi} \cos \varphi + 2\zeta_c\dot{\varphi}\dot{\psi} \sin \varphi - \\
 &- 2\zeta_c\omega\dot{\varphi} \cos \varphi \cos \psi + \xi_c\omega^2 \cos^2 \psi + \eta_c\omega^2 \sin \psi \sin \varphi \cos \psi + \zeta_c\omega^2 \sin \psi \cos \varphi \cos \psi] - \\
 &- 2m\dot{\zeta}_c(\dot{\psi} \cos \varphi + \omega \cos \psi \sin \varphi) + 2m\dot{\eta}_c(-\dot{\psi} \sin \varphi + \omega \cos \psi \cos \varphi) + p \sin \psi; \\
 m\ddot{\eta}_c &= m[\xi_c\dot{\psi} \sin \varphi + \eta_c\dot{\psi}^2 \sin^2 \varphi + \eta_c\dot{\varphi}^2 - 2\eta_c\omega\dot{\varphi} \sin \psi + \zeta_c\dot{\psi}^2 \cos \varphi \sin \varphi + \\
 &+ \zeta_c\omega^2 \sin \psi \cos \psi \sin \varphi + \zeta_c\dot{\varphi} + \eta_c\omega^2 \sin^2 \psi \sin^2 \varphi + \zeta_c\omega^2 \sin^2 \psi \sin \varphi \cos \varphi + \\
 &+ 2\xi_c\omega\dot{\psi} \sin \psi \cos \varphi - 2\eta_c\omega\dot{\psi} \cos \psi \sin \varphi \cos \varphi - 2\zeta_c\omega\dot{\psi} \cos \psi \cos^2 \varphi + \eta_c\omega^2 \cos^2 \varphi - \zeta_c\omega^2 \sin^2 \varphi \cos \varphi] - \\
 &- 2m\dot{\xi}_c(-\dot{\psi} \sin \varphi + \omega \cos \psi \cos \varphi) + 2m\dot{\zeta}_c(\dot{\varphi} - \omega \sin \psi) - p \cos \psi \sin \varphi; \\
 m\ddot{\zeta}_c &= m[\xi_c\omega^2 \cos \psi \sin \psi \cos \varphi + \eta_c\omega^2 \sin^2 \psi \sin \varphi \cos \varphi - \eta_c\omega^2 \sin \varphi \cos \varphi + \\
 &+ \zeta_c\omega^2 \sin^2 \psi \cos^2 \varphi + \zeta_c\omega^2 \sin^2 \varphi - 2\zeta_c\omega\dot{\varphi} \sin \psi + \xi_c\ddot{\psi} \cos \varphi + \eta_c\dot{\psi}^2 \sin \varphi \cos \varphi - \eta_c\ddot{\varphi} + \\
 &+ \zeta_c\dot{\psi}^2 \cos^2 \varphi + \zeta_c\dot{\varphi}^2 - 2\xi_c\omega\dot{\psi} \sin \psi \sin \varphi + 2\eta_c\omega\dot{\psi} \cos \psi \sin^2 \varphi + 2\zeta_c\omega\dot{\psi} \cos \psi \sin \varphi \cos \varphi] - \\
 &- 2m\dot{\eta}_c(\dot{\varphi} - \omega \sin \psi) + 2m\dot{\xi}_c(\dot{\psi} \cos \varphi + \omega \cos \psi \sin \varphi) - p \cos \psi \cos \varphi.
 \end{aligned} \quad (17)$$

Начальными условиями для интегрирования системы дифференциальных уравнений (17) будут значения трех координат центра масс детали ( $\xi_{co}$ ,  $\eta_{co}$ ,  $\zeta_{co}$ ), найденных в момент отрыва детали от плоскости вибрационного диска при решении системы дифференциальных уравнений (17), а также значения проекций относительной скорости центра масс на оси системы координат, найденных для того же момента времени. При дальнейшем интегрировании системы дифференциальных уравнений предполагают, что при возникновении контакта детали с втулкой удар был абсолютно неупругим.

## Заключение

На основе созданной математической модели можно решать прямую задачу динамики. Наличие аналитической модели процесса роботизированной сборки с использованием эффекта вращательного движения схвата позволит провести математическое моделирование процесса и определить условия выполнения сборки без заклинивания деталей, т.е. повысить технологическую надежность процесса. Исследование сил в зоне сборки провели с помощью силомоментного датчика Schunk IT

АХІА, смонтированного на выходном звене робота АBB IRB-140. Влияние эффекта вращения отслеживали по изменению контактных состояний.

### Библиографический список

1. **Кристалъ М.Г.** Производительность и надежность сборочных автоматов. Волгоград: ВолГТУ, 2011. 160 с.
2. **Кристалъ М.Г., Чувилин И.А.** Исследование динамики вибрационного сопряжения с нижней опорой торца охватываемой детали // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 4. С. 13—17.
3. **Левчук Д.М.** Исследование и разработка методов относительного ориентирования сборочных единиц соединения во вращающемся потоке газов при автоматической сборке: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1974. 143 с.
4. **Bakšys V., Baskutienė J., Chadarovičius A.** Simulation of vibratory alignment of the parts to be assembled under passive compliance // *Mechanika*. 2013. Vol. 19 (1). P. 33—39.
5. **Bakšys V., Baskutiene J.** The directional motion of the compliant body under vibratory excitation// *International Journal of Non-Linear Mechanics*. Vol. 47. No. 3. 2012. P. 129—136.

6. **Черняховская Л.Б.** Влияние вращательного движения вала на процесс автоматической сборки цилиндрических деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 6. С. 7—13.

7. **Черняховская Л.Б.** Кинематический и динамический анализы автоматической сборки цилиндрических деталей. Самара: СамГТУ, 2011. 76 с.

8. **Божкова Л.В., Вартанов М.В., Кольчугин Е.И.** Экспериментальная установка для роботизированной сборки//Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 1. С. 5—7.

9. **Божкова Л.В., Вартанов М.В., Кольчугин Е.И.** Вопросы вибрационной технологии // Межвузовский сб. науч. статей "Вопросы вибрационной технологии". Ростов н/Д. 2006. С. 62—67.

10. **Иванов А.А.** Вибрационные сборочные системы // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 5. С. 7—10.

11. **Шуваев В.Г., Папшев В.А.** Устройство пространственного ориентирования деталей при автоматической сборке путем формирования сложного колебательного движения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 2. С. 23—25.

12. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики. СПб.: Лань, 2008. 736 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



## СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

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)





**А.С. Микаева**, канд. экон. наук, **С.А. Микаева**, д-р техн. наук  
(МИРЭА — Российский технологический университет)  
E-mail: mikaeva@npo.lit

## Сборка контроллера управления

Описана сборка контроллера управления, предназначенного для управления электронным пускорегулирующим аппаратом. Приведены технические характеристики контроллера. Представлены список команд, поддерживаемых контроллером при обмене по интерфейсу RS485, и дополнительные дискретные сигналы контроллера.

The assembly of the control controller for controlling an electronic start-up control device is described. The technical characteristics of the controller are given. The list of commands supported by the controller when exchanging via the RS485 interface and additional discrete controller signals is presented.

**Ключевые слова:** сборка, контроллер, лампа, ток, напряжение, характеристики, список команд, дискретные сигналы.

**Keywords:** assembly, controller, lamp, current, voltage, characteristics, list of commands, discrete signals.

Собранный контроллер предназначен для управления управляемым электронным пускорегулирующим аппаратом (УЭПРА) и изменения тока лампы, работающей с данным УЭПРА [1–8]. Контроллер работает в сетях постоянного тока. Взаимодействие с УЭПРА осуществляется по двухпроводной линии длиной до 20 м, выполненной в виде витой пары. Информация передается токовыми посылками 3...20 мА. Пять выходных каналов управления контроллера поочередно передают одну и ту же команду. К каждому каналу можно подключить до 50 УЭПРА, т.е. всего 250. Выход защищен от коротких замыканий. Выходные линии имеют гальваническую развязку с цепями управления и питания с испытательным напряжением 1500 В и защищены от коротких замыканий. Протокол управления электронного пускорегулирующего аппарата (ЭПРА) специализированный [9, 10].

Контроллер NF-K-001 имеет цифровое управление от ЭВМ по интерфейсу RS485, контроллер NF-K-002 — аналоговое управление, унифицированным током 4 ... 20 мА или напряжением 0 ... 10 В. Тип модуля NF-K-001 или NF-K-002 выбирают командой "Установить конфигурацию модуля" по интерфейсу RS485. При выпуске с завода устанавливается тип NF-K-002 (ЗАО "ЛИТ", Москва).

### Технические характеристики NF-K-001, NF-K-002

Номинальное напряжение питания, В . . .	$24^{+3}_{-2}$
Номинальный ток потребления в фазе, А, не более . . . . .	0,15
Число подключаемых УЭПРА, не более . . .	250
Предел регулирования тока лампы для данных типов УЭПРА, % . . . . .	$(50...100) \pm 1$
Габаритные размеры, мм . . . . .	105×56×58
Масса, кг . . . . .	$0,2 \pm 0,006$

Габаритно-присоединительные размеры контроллера и этикетка со схемой подключения приведены на рисунке.

Отличительные особенности контроллера NF-K-001 [1–3, 6, 8]:

взаимодействует с ЭВМ по двухпроводной согласованной линии в полудуплексном режиме (микросхема MAX1487);

согласующие резисторы в контроллере не установлены;

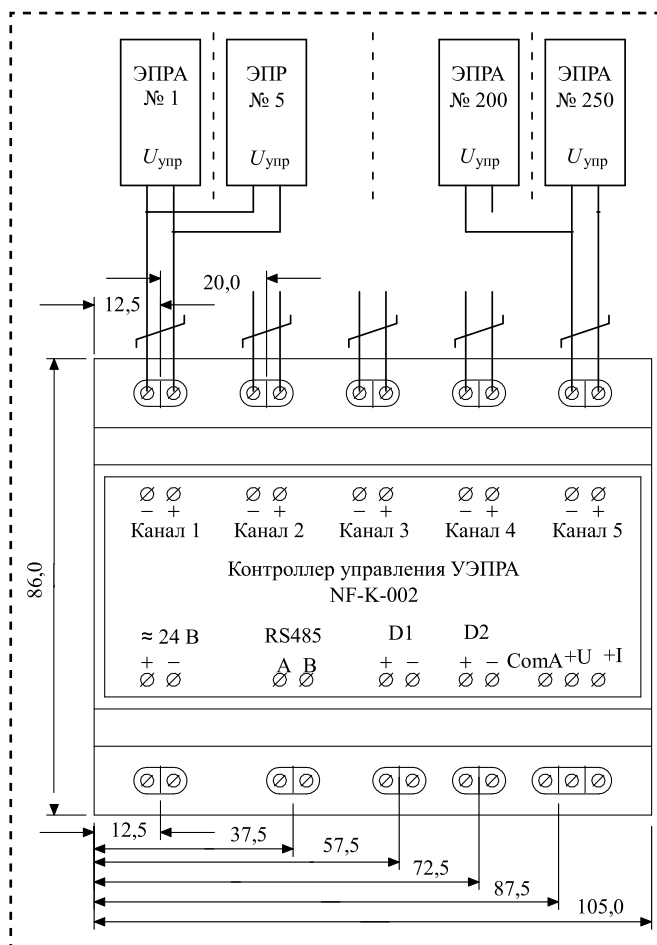
в системе является ведомым устройством;

обмен проводится стандартным асинхронным последовательным кодом: 1 стартовый бит, 8 бит данных и 1 стоповый без контроля четности;

скорость обмена программируемая;

поддерживает скорости 1200 (тип модуля — "03"), 2400(04), 4800(05), 9600(06), 19 200(07) бит/с;

имеет собственный адрес в пределах от 0 до 255, который может изменяться потребителем



**Габаритные и присоединительные размеры и этикетка контроллера NF-K-002**

(при выпуске с завода устанавливается адрес "00" и скорость обмена 9600 бит/с).

После включения питания контроллер самотестируется с проверкой ROM и EEPROM. При ошибках ROM управление не проводится и на все команды, кроме запроса состояния, дается ответ  $!AA$  (если ошибка не затрагивает область обмена). При ошибках EEPROM в части скорости обмена, обмен проводится на скорости 9600 бит/с. Если ошибка в части собственного адреса, работа проводится на скорости 9600 бит/с с адресом "00". По окончании тестирования контроллер выдает на ЭПРА команду установить ток 100 % от номинала. Команды "Установить заданный ток" и "Выключить" передаются на ЭПРА непрерывно. Команда "Сброс" передается в течение 5 с, затем — "Установить ток 100 %". Команда "Сброс неработающих" передается 5 с, затем — "Установить ток XX %", где XX — ток, который был до получения команды. Контроллер имеет защиту от понижения питания и зави-

саний. При возникновении сбоев контроллер перезапускается с установкой тока 100 %. При цифровом управлении аналоговые и дискретные входы игнорируются, но можно прочитать измеренное напряжение и ток.

Список команд, поддерживаемых контроллером при обмене по интерфейсу RS485:

1. Установить конфигурацию модуля  
 $\%AANN TTCCFF[CHK](cr)$ ,

где AA — старый адрес модуля (от 00 до FF, при выпуске с завода 00);

NN — новый адрес модуля (от 00 до FF);

TT — тип модуля (при выпуске с завода "01" — цифровое управление; "02" — аналоговое управление);

CC — скорость обмена (при выпуске с завода установлено значение "06" — 9600 бит/с);

FF — формат данных (параметр игнорируется);  
 [CHK] — контрольная сумма.

Ответ:

норма  $!NN[CHK](cr)$  NN — новый адрес;

ошибка  $?AA[CHK](cr)$  AA — старый адрес.

Скорость и тип модуля изменяются только при адресе модуля "FF", для других игнорируются. При смене скорости запрос вернет новое значение скорости, но работа на новой скорости будет только после выключения и повторного включения.

2. Команды управления УЭПРА (не поддерживаются при аналоговом управлении):

$\$AA<command>[CHK](cr)$ ,

где AA — адрес модуля;

$<command>$  — команды управления УЭПРА из набора: RESET — общий сброс УЭПРА (эквивалентен выключению и включению), RSTERR — сброс УЭПРА, которые были выключены до сброса из-за невозможности поджечь лампу за заданное число попыток, остальные аппараты не реагируют;

OFF — выключить;

$I = XX$  — установить заданный ток, где XX — значение тока в шестнадцатеричном виде в процентах от номинального значения от 00 до 7Fh (ток от 0 до 127 %).

Пример:

$I = 64$  — номинальный ток  $I_{nom}$ ;

$I = 32$  —  $0.50 \cdot I_{nom}$ .

Ответ:

норма  $!AA[CHK](cr)$ ;

ошибка  $?AA[CHK](cr)$ .



Если было выключение командой OFF, то сначала включают контроллер, затем выставляют ток.

При задании тока более 127 % вернется код ошибки.

В реальных условиях ЭПРА поддерживает регулировку от 50 до 100 % от номинального значения тока, и при задании параметров, выходящих за эти рамки, установятся предельные значения 50 или 100 % без сообщения об ошибке.

### 3. Чтение конфигурации:

\$AA2[CHK](cr).

Ответ:

норма —!AATTCCFF[CHK](cr);

ошибка —?AA[CHK](cr),

где AA — адрес модуля;

TT — тип модуля (01 — цифровое управление; 02 — аналоговое управление);

CC — скорость обмена (03 — 1200 бит/с, 04 — 2400 бит/с, 05 — 4800 бит/с, 06 — 9600 бит/с, 07 — 19 200 бит/с);

FF — произвольное число.

### 4. Чтение версии программы:

\$AAF[CHK](cr).

Ответ:

норма —!AAVV[CHK](cr);

ошибка —?AA[CHK](cr),

где AA — адрес модуля;

VV — версия от 00 до FF.

### 5. Чтение имени модуля:

\$AAM[CHK](cr).

Ответ:

норма —!AANF-K-002[CHK](cr);

ошибка —?AA[CHK](cr).

### 6. Чтение состояния УЭПРА:

\$AAN[CHK](cr).

Ответ:

норма —!AAN[CHK](cr);

ошибка —?AA[CHK](cr),

где AA — адрес модуля;

II — значение заданного тока в шестнадцатеричном виде в процентах от номинального значения (от 00 до 7Fh (ток 0 ... 127 %)), либо "FF" при выключении по команде "OFF", либо "CC" при выдаче команды "RESET" (общий сброс), либо "C3" при выдаче команды "RSTERR" (сброс неработающих).

### 7. Чтение состояния:

~AA0[CHK](cr).

Ответ:

норма —!AASF[CHK](cr);

ошибка —?AA[CHK](cr),

где SF — состояние (S = 0 — норма, S ≠ 0 — неисправность, F — произвольная HEX-цифра).

### 8. Чтение аналогового измерителя:

\$AAMU[CHK](cr).

Ответ:

норма —!AAUU,UUVII,IIIImAKKKpc[CHK](cr);

ошибка —?AA[CHK](cr),

где UU, UUU — измеренное напряжение аналогового входа, В;

II, III — измеренный ток аналогового входа, мА;

KKK — установленный процент тока (десятичный) или выдаваемая команда в десятичном виде ("170" — при выключении по команде "OFF", "204" — при выдаче команды "RESET" (общий сброс), "195" — при выдаче команды "RSTERR" (сброс неработающих)). Команда не зависит от измерения и дискретных входов при типе контроллера 001. Передние незначащие нули заменяются пробелами.

Команды передают контроллеру ASCII символами верхнего или нижнего регистра латинского алфавита. Возвращаются ответы символами верхнего регистра. Команда завершается контрольной суммой [CHK] и кодом возврата каретки <0D>. Числа шестнадцатеричные от 00 до FF. Недопустимые символы в команде при правильной контрольной сумме вызывают ответ с кодом ошибки, символы после <cr> до префикса следующей используемой команды игнорируются.

Контрольная сумма [CHK] — младший байт арифметического суммирования ASCII кодов от префикса до байта перед контрольной суммой, представленный двумя ASCII HEX символами. Первая цифра — старшая тетрада. Если контрольная сумма не совпала, команда игнорируется и ответ не возвращается.

Время между символами в принимаемой команде не ограничено. Передача ведется без пауз между символами.

Ответ на команду начинает передаваться не ранее, чем через время передачи 1 байта (10 бит включая старт-стоп) на заданной скорости плюс 20 мкс и не позднее указанного времени плюс 5 мс. Для команды установки конфигурации ответ передается сразу после получения команды. Но после этого понадобится около 200 мс для перезаписи EEPROM. Для гарантирования изменения необходимо убедиться в правильности записи путем чтения командой чтения конфигурации через 0,5 с.



Отличительные особенности контроллера NF-K-002:

аналоговое управление осуществляется напряжением 0 ... 10 В при подаче сигнала на клеммы " + U" и "ComA" либо током 4 ... 20 мА при подаче сигнала на клеммы " + I" и "ComA". При одновременной подаче сигналов на клеммы " + U" и " + I" выходное состояние не определено.

При аналоговом управлении сигналы соответствуют:

- $\geq 10$  В (20 мА) — 50 % мощности;
- $\leq 2$  В (4 мА) — 100 % мощности;
- $\leq 1,75$  В (3,5 мА) или обрыве — устанавливается 100 % мощности через 30 с;
- 2...10 В (4 ... 20 мА) — мощность изменяется линейно от 100 до 50 %.

Погрешность выдачи команды установки заданного тока — не более 1,0 %. При аналоговом управлении для сброса и выключения ЭПРА используют дополнительные дискретные сигналы (таблица).

Контроллер реагирует на появление и снятие дискретного сигнала на входе с задержкой 1 с. При этом команда "Сброс неработающих" передается все время наличия на входе сигнала и еще 5 с после снятия сигнала, далее устанавливается заданный ток. Команда "Общий сброс" передается при поступлении дискретного сигнала D2 при установленном сигнале D1. При установленном D1 команда передается все время наличия D2 и еще 5 с после снятия D2. Если D1 снимается, то сразу снимается и команда "Общий сброс".

При аналоговом управлении допускается подключение контроллера к ЭВМ по интерфейсу RS485. При этом контроллер может выполнять все команды от ЭВМ, кроме команд управления УЭПРА ("Установить заданный ток", "Общий сброс", "Сброс неработающих",

Дополнительные дискретные сигналы для контроллера NF-K-002

Сигнал D1	Сигнал D2	Передаваемая команда
—	—	Установить заданный ток
+	—	Выключить
—	+	Сброс неработающих
+	+	Общий сброс
+ наличие сигнала — постоянное напряжение $24^{+3}_{-2}$ В; — отсутствие сигнала — напряжение менее 12 В.		

"Выключить"). Это позволяет контролировать измеренное контроллером напряжение и ток командой "Чтение аналогового измерителя". При подключении к интерфейсу RS485 разность потенциалов между сигналами А и В интерфейса RS485 и общим проводом аналогового входа "ComA" не должна превышать (–5 ... + 9) В; входное сопротивление входа управления током — 300 Ом; входное сопротивление входа управления напряжением — 5 кОм; время усреднения измерения аналогового сигнала — 0,4 с; ток дискретного управления при напряжении 24 В — не более 5 мА; предельное напряжение на входах аналогового управления напряжением и током — не более  $\pm 27$  В; предельное напряжение на входах дискретного управления — не более  $\pm 35$  В.

Входы аналогового и дискретного управления имеют гальваническую развязку между собой и цепью питания 24 В. Сопротивление утечки не менее 5 мОм при напряжении 250 В. Вход RS485 и аналоговые входы между собой не развязаны.

#### 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.** Автоматизированная сборка компактных люминесцентных ламп // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 2. С. 36–38.
5. **Ашрятов 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. **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е.** Системы обеззараживания ультрафиолетом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 2. С. 44–48.
7. **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е., Амеликина С.А.** Облучатели бактерицидные // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 3–6.
8. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 11. С. 8–11.
9. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.
10. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Промышленная электроника. Импульсные устройства и основы микропроцессорной техники. Казань: Бук, 2019. 250 с.



А.П. Фот, д-р техн. наук (Оренбургский государственный университет)  
E-mail: fot@mail.osu.ru

## Сборка гитар станков на основе модернизированных комплектов сменных зубчатых колес

*Предложен способ сборки двухпарных гитар с переменными межосевыми расстояниями, используемых в металлорежущих станках различных типов. Приведено обоснование возможности повышения качества и уменьшение времени настройки гитар — увеличение числа реализуемых модернизированным комплектом сменных зубчатых колес гитар передаточных отношений при сохранении числа сменных зубчатых колес в комплекте. Комплекты создаются на основе программного средства, обеспечивающего выполнение настройки двухпарных гитар станков с учетом основных кинематических и конструктивных ограничений. Используются аналитические методы и методы машинного эксперимента.*

*A method of assembling the twin-paired change gear quadrant with variable center distance that used on different metalworking machine tools is proposed. The possibility to increase the quality and reducing time of gears adjustment is proved — increase number of gear ratios provided by the modernized set of change gears while the number of change gears in set remains constant. Sets are created based on software tool executing the adjustment of twin-paired change gear quadrants regarding the primary kinematic and design constraints of a machine. The analytical methods and methods of computer modeling are used.*

**Ключевые слова:** гитара станка, комплект сменных зубчатых колес, способ сборки двухпарной гитары.

**Keywords:** change gear quadrant, change gears set, method of assembling a twin-paired gear quadrant.

Авторы одной из последних работ [1] в области анализа состояния станочного парка России отмечают, что: "...более 80 % от парка механообрабатывающих станков российского производства имеет износ более 60 %..."; "...современное российское оборудование возраста 2000—2018 годов (не старше 20 лет) не превышает доли в 15 % в общем составе станочного парка..."; "...удельная доля станков зарубежного производства в общем парке механообрабатывающего оборудования РФ составляет около 30 %..."; "...удельный вес автоматизированных российских станков с ЧПУ в станочном парке РФ составляет не более 10 %, что значительно ниже требований высокотехнологичных производств зарубежных стран, где аналогичное соотношение превышает 40 %...".

Доля универсальных металлорежущих станков является преобладающей в станочном парке. При этом большинство зубчатых колес, изделий с винтовыми поверхностями и других сложных изделий изготавливают на станках,

имеющих во внутренних кинематических цепях гитары со сменными зубчатыми колесами, позволяющими относительно просто осуществлять точную настройку станков при обработке сложных поверхностей.

Наиболее часто в станках встречаются двухпарные гитары с переменными межосевыми расстояниями, реализующие тысячи передаточных отношений. На сегодняшний день нет единой методики проектирования "оптимальных" гитар и критериев оценки оптимальности основных компонентов гитар — комплектов сменных зубчатых колес.

Один из наиболее трудоемких этапов в настройке кинематической цепи станка с гитарой — определение требуемых значений чисел зубьев колес гитары (в двухпарной гитаре их четыре) или "сборка" гитары из колес имеющегося комплекта. Существуют разные подходы к этой операции, но чаще всего используют специальные таблицы [2 — 4]. Руководящие материалы Д11-20 Экспериментального научно-исследовательского института металлорежущих станков



(ЭНИМС) определяют "нормальные" общий и частные ряды чисел зубьев колес комплектов гитар для станков разных групп [5].

Например, в работе [4] предложены:

"минимальные" комплекты из общего ряда из 44 колес с числами зубьев 20, 23, 25, 30, 33, 34, 35, 37, 40, 41, 43, 45, 47, 50, 53, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 67, 70, 71, 73, 75, 79, 80, 83, 85, 89, 90, 92, 95, 97, 98, 100, 105, 110, 113, 115, 120 и 127;

"для делительных головок фрезерных станков" из 12 колес с числами зубьев 25, 25, 30, 35, 40, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100;

"пятковый комплект для токарных и соответствующих станков" из 24-х колес с числами зубьев 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 97, 100, 105, 110, 113, 115, 120, 127;

комплект "цепи средней точности (дифференциала, обкатки и др.)" из 29 колес с числами зубьев 23, 25, 30, 33, 37, 40, 41, 43, 45, 47, 50, 53, 55, 58, 60, 61, 62, 65, 67, 70, 73, 79, 83, 85, 89, 92, 95, 98, 100;

комплект "цепи повышенной точности" из 36 колес с числами зубьев 23, 25, 30, 33, 34, 35, 37, 40, 41, 43, 45, 47, 50, 53, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 67, 70, 71, 73, 75, 79, 80, 83, 85, 89, 92, 95, 97, 98, 100;

комплект "затыловочные станки и другие с делительной цепью и цепью дифференциала или обкатки" из 43 колес с числами зубьев 23, 25, 30, 33, 34, 35, 37, 40, 41, 43, 45, 47, 50, 53, 55, 58, 59, 60, 61, 62, 65, 67, 70, 71, 73, 75, 79, 80, 83, 85, 89, 90, 92, 95, 97, 98, 100, 105, 110, 113, 115, 120, 127.

Конкретного обоснования (принципов) назначения чисел колес и их зубьев как общего, так и частных комплектов в работах [2–5] не приведено.

Поставлена задача поиска "оптимальных" комплектов и выбора требуемых колес из комплекта при сборке гитар.

Необходимо выбрать критерии сравнения комплектов колес. Для оценки комплекта можно использовать: число сменных зубчатых колес  $K_Z$ , число реализуемых колесами передаточных отношений КПО, минимальное  $U_{\min}$  и максимальное  $U_{\max}$  значения реализуемых передаточных отношений, суммарный габарит  $\Gamma$  (масса) комплекта. Перечисленные параметры можно заменить интегральным показателем качества комплекта ИПК, определяемым по зависимости:

$$\text{ИПК} = \text{КПО} \cdot U_{\max} / (\Gamma \cdot U_{\min} K_Z).$$

Большее значение ИПК соответствует более удачному варианту комплекта.

Важнейшая характеристика комплекта (сочетания колес гитары) — погрешность  $\Pi$  реализуемого передаточного отношения — абсолютная либо относительная при сравнении с требуемым по технологическому процессу. Для оценки комплекта можно использовать число зубьев  $Z_M$  наибольшего колеса (желательно использовать колеса с меньшими значениями  $Z_M$ , поскольку увеличение последнего ведет к снижению точности изготовления колеса).

Кроме перечисленного могут быть использованы и другие критерии, например, плотность передаточных отношений в заданном интервале значений последних.

Следующий этап оптимизации — установление принципов назначения рядов чисел зубьев колес комплекта. Конкретных единых рекомендаций назначений пока нет. В работе [3] говорится о "нормальности" рядов, что подразумевает, очевидно, соответствие руководящим документам — нормальям станкостроения [5]. В некоторых комплектах частично используется ряд с изменением числа зубьев на определенное число (например, в "пятковом" комплекте) [4].

Согласно результатам проведенного анализа общего ряда чисел зубьев из 44 значений установлено, что он начинается с числа 20, завершается числом 127 и приближается к арифметической прогрессии со знаменателем 2,2306 (отклонение фактических значений от расчетных составляет  $(-4,9413 \dots + 10,9879) \%$  [4]. Скорее всего, частные ряды были построены на основе опыта эксплуатации станков различных типов.

Развитие вычислительной техники позволяет существенно ускорить процессы создания комплектов и их оценки [6 — 8, 11]. Трудоемкость процесса снижается в десятки раз при одновременном повышении точности расчетов.

Разработаны алгоритм и программа расчета параметров комплектов, и по итогам численных экспериментов установлено, что более оптимальным является общий ряд чисел зубьев из 43 значений, начинающийся с числа 20, завершающийся числом 97 и приближающийся к геометрической прогрессии со знаменателем 1,03624 [9, 10].



Особенность предложенного алгоритма — возможность проведения расчетов параметров комплектов для гитар цепей подач и цепей главного движения с соблюдением кинематических ограничений на значение передаточного отношения  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$  пары зубчатых колес с числами зубьев из заданного ряда, конструктивных ограничений (условие сцепляемости), условия обеспечения минимальных радиальных габаритов сборки колес гитары (при выборе сочетаний колес, обеспечивающих одинаковые значения передаточных отношений). В итоге расчета формируется "ряд влияния" по частоте участия каждого колеса (все значения чисел зубьев от наименьшего до наибольшего колес) комплекта в реализации передаточных отношений, определяется ИПК и его составляющие

(КПО, Г и др.). Завершающий этап — создание итогового ряда влияния по частоте зацепления зуба каждого колеса комплекта при реализации передаточных отношений (первым в итоговом ряду влияния является колесо, зубья которого наиболее часто участвуют в зацеплении). Затем из итогового ряда выбираются  $N$  первых колес ( $N$  равно желаемому числу колес в комплекте). По данным созданного комплекта проводят расчет его оценочных параметров [9].

Предложенное решение позволяет реализовать единый принцип создания комплектов сменных колес гитар станков и определения требуемого сочетания чисел зубьев колес комплекта гитары. Трудоемкость настройки гитары (сборки гитары) при использовании предложенного решения существенно сокращает-

Параметры существующих С и предлагаемых П комплектов К

К	КПО	$U_{\min}$	$U_{\max}$	Г	ИПК	Ряд чисел зубьев
$K_z = 12$						
С	693	0,069444	7,466667	43 500	0,142742989	25; 25; 30; 35; 40; 50; 55; 60; 70; 80; 90; 100
П	2970	0,168607	5,930952	14 198	0,613192507	20; 21; 22; 23; 25; 29; 31; 37; 41; 43; 47; 53
$K_z = 24$						
С	19 452	0,041667	7,972778	160 457	0,966522102	20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60; 65; 70; 75; 80; 85; 90; 95; 97; 100; 105; 110; 113; 115; 120; 127
П	58 020	0,072828	7,888278	50 427	5,192627571	20; 21; 22; 23; 25; 26; 27; 29; 31; 34; 37; 38; 39; 41; 43; 47; 49; 53; 59; 61; 67; 71; 73; 79
$K_z = 29$						
С	117 091	0,058673	7,913043	121 051	4,498444501	23; 25; 30; 33; 37; 40; 41; 43; 45; 47; 50; 53; 55; 58; 60; 61; 62; 65; 67; 70; 73; 79; 83; 85; 89; 92; 95; 98; 100
П	126 678	0,064054	7,888278	64 018	8,403051985	20; 21; 22; 23; 25; 26; 27; 29; 31; 32; 33; 34; 35; 37; 38; 39; 41; 43; 47; 49; 53; 58; 59; 61; 67; 71; 73; 79; 83
$K_z = 36$						
С	262 656	0,058673	7,913043	153 388	6,415029703	23; 25; 30; 33; 34; 35; 37; 40; 41; 43; 45; 47; 50; 53; 55; 58; 59; 60; 61; 62; 65; 67; 70; 71; 73; 75; 79; 80; 83; 85; 89; 92; 95; 97; 98; 100
П	271 774	0,048651	7,951299	94 597	13,04290574	20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 31; 32; 33; 34; 35; 37; 38; 39; 41; 43; 46; 47; 49; 53; 58; 59; 61; 62; 67; 71; 73; 77; 79; 83; 89; 97
$K_z = 43$						
С	460 379	0,041667	7,983696	241 136	8,507398107	23; 25; 30; 33; 34; 35; 37; 40; 41; 43; 45; 47; 50; 53; 55; 58; 59; 60; 61; 62; 65; 67; 70; 71; 73; 75; 79; 80; 83; 85; 89; 90; 92; 95; 97; 98; 100; 105; 110; 113; 115; 120; 127
П	492847	0,048651	7,973602	123 083	15,26189184	20; 21; 22; 23; 24; 25; 26; 27; 28; 29; 31; 32; 33; 34; 35; 37; 38; 39; 40; 41; 43; 46; 47; 49; 51; 53; 55; 57; 58; 59; 61; 62; 65; 67; 71; 73; 77; 79; 81; 83; 85; 89; 97



ся, поскольку после занесения в программу требуемого значения передаточного отношения в онлайн-режиме программа выдает требуемое сочетание чисел зубьев четырех колес гитары, фактическое значение передаточного отношения и отклонения (абсолютное и относительное) от требуемого значения [10].

В качестве подтверждения эффективности предложенной методики создания комплектов сменных колес гитар в таблице приведены результаты расчета параметров существующих С и предлагаемых П комплектов К. Помимо увеличения ИПК уменьшается число зубьев наибольших колес комплектов.

### Заключение

Предложенный способ модернизации существующих минимальных комплектов сменных зубчатых колес гитар станков при сохранении числа колес обеспечивает существенное их улучшение: масса комплектов уменьшается в 1,62...3,18 раза; число реализуемых передаточных отношений возрастает в 1,03...2,98 раза; значение интегрального показателя качества увеличивается в 1,87...5,37 раза; число зубьев наибольшего колеса комплекта уменьшается в 1,03...1,89 раза.

Уменьшается трудоемкость операции по сборке гитары (время для определения требуемого сочетания чисел зубьев колес).

### Библиографический список

1. **Макаров В.М., Лукина С.В.** Станочный парк цифрового производства // РИТМ машиностроения. 2019. № 9. С. 32–39.

2. **Сандаков М.В., Вегнер В.А., Вегнер М.К.** Таблицы для подбора шестерен: справочник. М.: Машиностроение, 1988. 571 с.

3. **Шишков В.А.** Подбор зубчатых колес. М.—Л.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1946. 208 с.

4. **Петрик М.И., Шишков В.А.** Таблицы для подбора зубчатых колес. М.: Книга по Требованию. 2013. 527 с.

5. **Нормали** станкостроения: сборник / Колеса зубчатые сменные металлорежущих станков: руководящий материал Д11-20. М.: Центральное бюро технической информации. 1958. 319 с.

6. **Верейна Л.И.** Зависимость точности кинематической настройки станков от состава набора сменных зубчатых колес // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 10. С. 15–19.

7. **Федосеенко В.О.** Влияние числа сменных зубчатых колес на погрешность наладки зуборезного станка // СТИН. 2010. № 12. С. 33–36.

8. **Верейна Л.И.** Подбор сменных зубчатых колес в кинематических цепях зуборезных станков с помощью ЭВМ // Станки и инструмент. 1989. № 4. С. 27–29.

9. **Фот А.П., Мочалин А.В.** Настройка двухпарных гитар станков с использованием ЭВМ // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 4. С. 189–196.

10. **Св.-во гос. рег. прогр.** для ЭВМ № 2015611785, Российская Федерация. Программа "Гитара станка двухпарная — электронная таблица настроек" / А.П. Фот, А.В. Мочалин; правообладатель — федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Оренбургский государственный университет". № 20146622785; дата поступления 11.12.2014 г.; дата регистр. в Реестре программ для ЭВМ 06.02.2015 г. Оpubл. 20.03.2015 г.

11. **Программы** для расчета зубчатых передач, наладки зубофрезерных и зубодолбежных станков, стыковка ПК и ЧПУ. [Электронный ресурс] URL: <http://www.pnbgear.narod.ru> (дата обращения 27.01.2013).



**М.Э. Захарова**, канд. техн. наук, **П.Ю. Васильева**, **Н.А. Арсенов**  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: vin.m@bmstu.ru

## Герметизация ответственных соединений головки блока цилиндров клеевыми составами

*Приведены требования к клеевым составам, обеспечивающим заданную прочность соединения. Описана конструкция головки блока цилиндров и ее составляющих. Обосновано использование клеевого состава в качестве средства герметизации. Представлены критерии выбора оптимального клеевого соединения. Проведен сравнительный анализ клеевых составов разных марок.*

*The classification of adhesive compositions is considered. The requirements for adhesive compositions that provide a given joint strength are given. The design of the cylinder head and its components is described and the use of adhesive composition as a means of sealing is justified. The criteria for selecting the optimal adhesive connection are presented. A comparative analysis of adhesive compositions of different brands is presented.*

**Ключевые слова:** клеевые составы, клеевые соединения, головка блока цилиндров, ответственные соединения.

**Keywords:** adhesive compounds, adhesive joints, cylinder head, responsible connections.

### Введение

Клеевые составы — многокомпонентные вещества на основе органических и неорганических веществ, способные создавать неразъемные соединения различных материалов. Создание неразъемных соединений путем склеивания обусловлено образованием прочной адгезионной связи между клеевым составом и соединяемыми материалами.

Широкая номенклатура клеевых материалов позволяет применять их во многих технологических процессах и обеспечивать требования, предъявляемые к готовым изделиям. С помощью клеевых соединений можно сократить число операций при сборке, тем самым снизить затраты на производство изделий, соответственно, время изготовления. Клеевые соединения экономичны, просты в использовании и снижают металлоемкость конструкций [1].

Клеевые соединения обладают преимуществами по сравнению с заклепочными, сварными, а также болтовыми соединениями. Они обеспечивают:

- возможность соединять материалы различного рода;
- равномерное распределение напряжений в соединении;
- атмосферостойкость;
- коррозионную стойкость;
- сохранение механических характеристик соединяемых материалов;
- уменьшение массы сборочных конструкций;
- обеспечение герметичности соединений.

Рассмотрим возможность замены традиционного герметика на более экономически выгодный клеевой состав с улучшенными эксплуатационными характеристиками в целях снижения себестоимости производства двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

## Описание конструкции головки блока цилиндров

Головка блока цилиндров (ГБЦ) — один из наиболее ответственных узлов ДВС. В ГБЦ устанавливают органы газораспределения двигателя, некоторые элементы топливоподающей аппаратуры, часть впускных коллекторов, в ней имеется сеть каналов охлаждения соответствующих рабочих частей (деталей). Место установки ГБЦ в общей компоновочной схеме двигателя: непосредственно на блок цилиндров двигателя с предварительно установленной прокладкой (между ГБЦ и блоком), герметизирующей цилиндры.

Для однорядных двигателей ГБЦ имеет единую конструкцию, состоящую из одной части, ГБЦ для V- и W-образных двигателей состоит из отдельных частей для каждого ряда цилиндров.

Обычно ГБЦ с блоком цилиндров соединяют с помощью шпилек и болтов крепления головки.

Сравнивали несколько клеевых составов для соединения элементов ГБЦ бензинового четырехцилиндрового четырехтактного двигателя с рядным расположением цилиндров. В систему газораспределения данного двигателя входит шестнадцать клапанов (по четыре клапана на цилиндр, два впускных и два выпускных) и два распределительных вала.

ГБЦ двигателя представляет собой сборочный узел, состоящий из следующих элементов (рис. 1): головка блока 1 — нижняя, наиболее ответственная часть узла, в ней установлены органы газораспределения и сеть полостей для протекания охлаждающей жидкости, каналы для подачи масла. Данный элемент конструкции является несущим и, при использовании прокладки, крепится к блоку двигателя. Вращение распределительных валов 2 и 4 в головке блока обеспечивают подшипники, зафиксированные в корпусе 5. При сборке для герметизации между головкой блока и крышкой подшипников применяют различные составы герметиков. Для уплотнения получившихся зазоров между выходными участками распределительных валов, на которых установлены элементы привода, и головкой блока (корпусом подшипников) предусмотрены сальники 3. С противоположной стороны сальников для герметизации внутренней по-

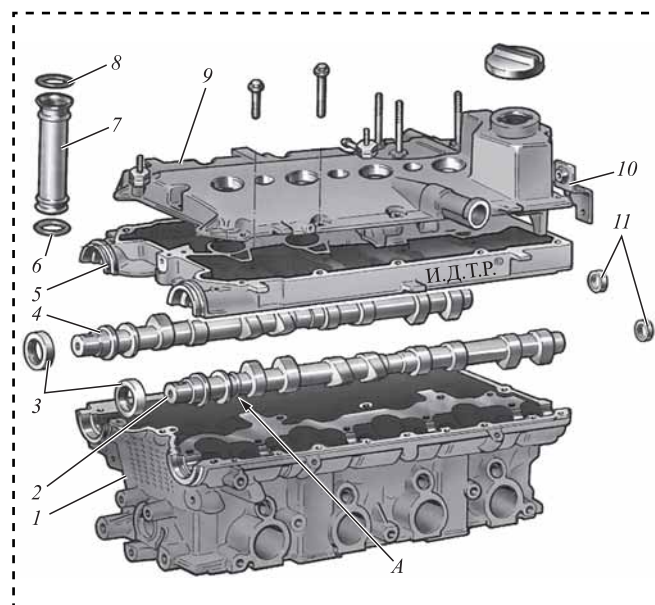


Рис. 1. Головка блока цилиндров:

1 — головка блока; 2 — впускной распределительный вал; 3 — сальник; 4 — выпускной распределительный вал; 5 — корпус подшипников распределительного вала; 6, 8 — уплотнительные кольца; 7 — направляющая труба; 9 — крышка головки блока; 10 — кронштейн крепления жгута проводов; 11 — заглушки; А — отличительный поясек впускного распределительного вала

лости головки блока установлены заглушки 11. При установке свеч зажигания и в отдельных случаях форсунок необходимо исключить контакт данных деталей с маслом и охлаждающей жидкостью, для этого предусмотрена направляющая труба 7 с уплотнительными кольцами 6 и 8 для создания необходимого давления в системах и предохранения от загрязнения элементов деталей. Внутренняя полость головки блока сверху закрывается крышкой 9.

В данной ГБЦ на месте стыка головки блока и корпуса подшипников использование прокладки недопустимо, так как посадочные места распределительных валов обрабатываются в сборе. Прокладка, в свою очередь, увеличивает толщину сборной конструкции. Ее использование, как и использование герметика, недостаточно эффективно выполняет функцию герметизации в условиях резких перепадов рабочих температур ГБЦ и окружающей среды, приведет к быстрому выходу из строя ГБЦ, износу посадочных мест, биению, разгерметизации.

Необходимый рабочий диапазон температур выбираемого клеевого состава:  $-50...150$  °С; устойчивость к давлению: 0,2...0,6 МПа.



### Подбор клеевого состава

При выборе герметика необходимо учитывать химический состав клеящего состава и рабочий температурный диапазон.

Требования, предъявляемые к клеящему составу для ГБЦ:

тип полимеризации: анаэробный или силиконовый;

однокомпонентный;

достаточное время отверждения: 10...20 мин;

исключение растекания после нанесения;

минимальная толщина создаваемого слоя;

работоспособность в течение большого периода времени.

Основная функция герметизации — соединение стыка головки блока и корпуса подшипников. Основная осевая сила, создаваемая давлением масла в системе, охлаждающей жидкостью, а также частью сил инерции подвижных узлов и деталей, принимают на себя винты, соединяющие указанные части ГБЦ (осевая сила  $F_0$ ). Клеевое соединение подвержено действию давления вдоль линии разъема головки блока и корпуса подшипников (сила  $F_p$ ) (рис. 2):

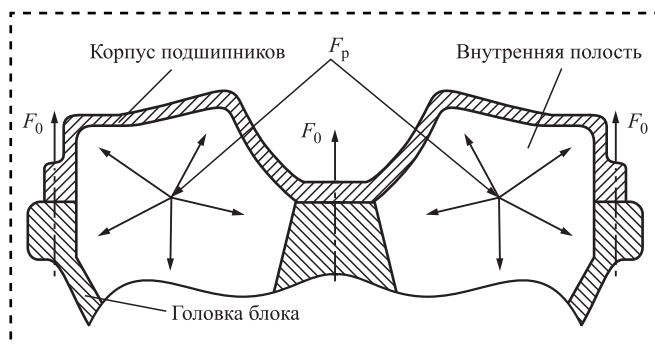


Рис. 2. Схема действия сил

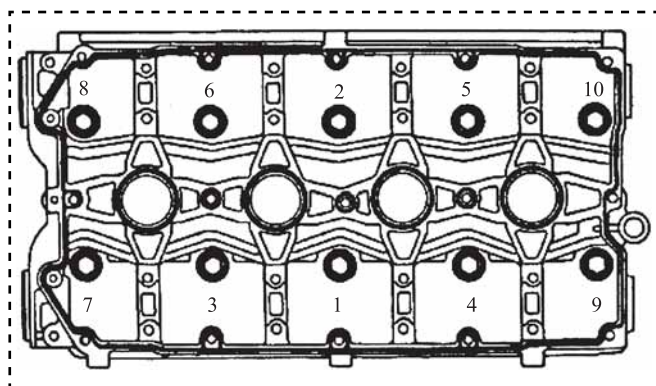


Рис. 3. Конфигурация площади разъема (место нанесения клеевого состава отмечено темным цветом)

$$\tau = \frac{P_{\text{расч}}}{bl},$$

где  $\tau$  — расчетное напряжение, которое способен выдержать клей-герметик, МПа;

$P$  — давление масла, МПа;

$bl$  — площадь разъема (площадь стыка соединяемых деталей, на которую необходимо нанести клеевой состав, рис. 3), м<sup>2</sup>.

### Определение оптимального клеевого состава

Клеевой состав марки *Анатерм* — анаэробная прокладка, представляющая собой клеевую композицию, обладающую высокой вязкостью, а также способностью длительно сохранять клеящие свойства при хранении. Клеевой состав предназначен для уплотнения и герметизации неподвижных разъемных соединений. Одна из положительных черт такого клея — способность быстро отверждаться в зазорах между соединяемыми поверхностями, в частности, металлическими. Клей-герметики марки *Анатерм* отечественного производства разработаны в ФГУП "НИИ полимеров". На сегодняшний день данные составы являются практически единственной альтернативой зарубежным аналогам. Отличительная особенность клеевых составов *Анатерм* — их работоспособность в различных агрессивных средах: масло (машинное), топливо, охлаждающие жидкости (тосол).

#### Технические характеристики клеевого состава *Анатерм-501М*

Динамическая вязкость,	
МПа·с	50 000...300 000
Предел прочности при отрыве,	
МПа:	
через 3 ч, не менее	3
через 24 ч, не более	10
Давление, при котором сохраняется герметичность, МПа, не менее:	
на фланцевых соединениях	35
на резьбовых соединениях	35
Температурный диапазон эксплуатации, °С	−60...150
Максимально допустимый зазор, мм	0,35

Ввиду того, что у данного клеевого состава высокая скорость отверждения, его можно использовать сразу на этапе сборки двигателя.

Форма выпуска: в герметичных тубах, банках или флаконах уже готовым к применению.

Клеевые составы марки *LOCTITE* (дистрибьютор фирмы Henkel). Фирма *LOCTITE* представляет широкий выбор продукции, в частности, подходящих для использования при герметизации ГБЦ двигателя.

Клеевой состав *LOCTITE 574* относится к типу анаэробных герметиков. Предназначен, в основном, для герметизации металлических фланцевых соединений (коробки переключения передач, ДВС). Клей-герметик тиксотропен (способен уменьшать свою вязкость при механических воздействиях и увеличивать в состоянии покоя), данное свойство исключает растекание состава по поверхности при нанесении. *LOCTITE 574* способен работать в условиях обильной смазки (маслостойкость) и выдерживать давления до 0,5 МПа сразу после сборки соединяемых поверхностей (герметичность на низкое давление). Однако клеевой состав весьма чувствителен к материалу соединяемых поверхностей (разница по прочности клеевого соединения в зависимости от времени полимеризации) (рис. 4, *а*).

На рис. 4 за 100 % принята прочность клеевого соединения стали со сталью.

Клей-герметик производится в металлических тубах.

Клеевой состав *LOCTITE 5188* — анаэробный герметик, предназначенный для использования в жестких фланцевых соединениях, как правило, металлических (в ДВС, коробках переключения передач, картерах, крышках). Среди особых свойств данного состава следует отметить высокую эластичность при дли-

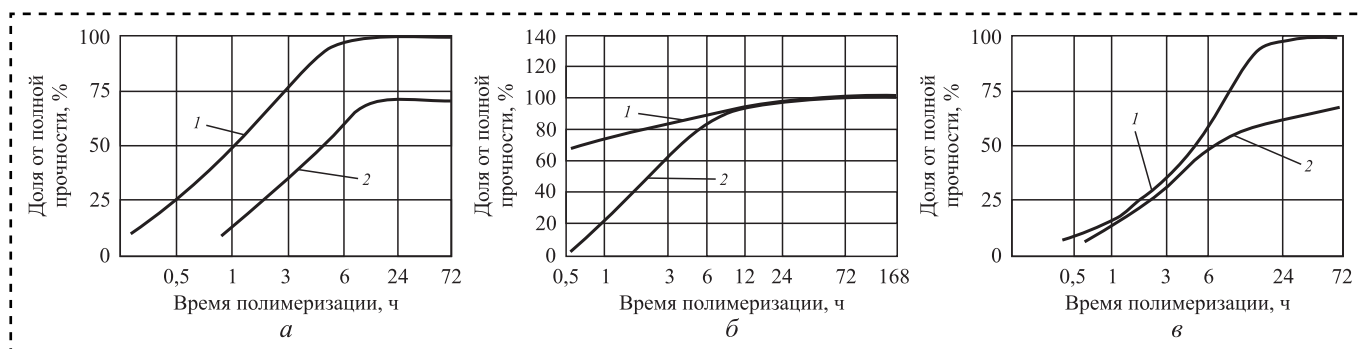
тельных температурных воздействиях, а также превосходную адгезию к металлам, в особенности, к алюминию. Клей-герметик *LOCTITE 5188* — маслостойкий и имеет хорошую стойкость к охлаждающим жидкостям. Высока общая химическая стойкость данного продукта. Зависимость прочности полученного соединения при нанесении на поверхности, изготовленные из различных материалов (в данном случае сталь, обработанная пескоструйным методом, и алюминий) от времени полимеризации представлена на рис. 4, *б*.

Клей-герметик производится в форме тубиков и картриджей.

Клеевой состав *LOCTITE 510* относится к типу анаэробных герметиков, важным его отличием от подобных составов является повышенная температурная стойкость. Клей-герметик тиксотропен (способен выдержать испытание низким давлением до начала полимеризации). Предназначен для уплотнения плотно прилегающих жестких металлических фланцев, имеет возможность работы в условиях агрессивных сред (по отношению к самому продукту). Прочность получаемых соединений зависит от материалов, на которые герметик наносится (рис. 4, *в*).

Сравнение характеристик рассматриваемых составов представлено в таблице.

Клеевой состав *LOCTITE 510* уступает по прочностным показателям составу *LOCTITE 574*, однако имеет более широкий температурный диапазон. В данном случае возможность увеличения рабочей температуры имеет второстепенное значение по сравнению с прочностными показателями, это связано с тем,



**Рис. 4. Зависимость прочности клеевого состава при соединении различных материалов в зависимости от времени полимеризации:**

*а* — сталь (1), алюминий (2); *LOCTITE 574*; *б* — сталь (1), обработанная пескоструйным методом, и алюминий (2); *LOCTITE 5188*; *в* — сталь (1), алюминий (2), *LOCTITE 510*



## Сравнение выбранных клеевых составов

Параметры	Анатерм-501М	LOCTITE 574	LOCTITE 5188	LOCTITE 510
Предел прочности при разрыве через 24 ч после сборки, МПа	10	5	4	5
Предел прочности при сдвиге через 24 ч после сборки, МПа	7	8,5	3	7
Гарантированный герметизированный зазор, мм	0,35	0,25		
Диапазон рабочих температур, °С	-60 ...+150	-55 ...+150		-55 ...+250
Цена за емкость, руб.	5530	7637	12 780	6999

что серийное производство двигателей не распространяется на высокофорсированные модели и вполне достаточно рабочей температуры обычных герметиков (до + 150 °С), так как выше этой температуры детали чаще всего не нагреваются.

Отечественный герметик Анатерм-501М превосходит по пределу прочности при разрыве состав LOCTITE 574 и почти равен по пределу прочности при сдвиге. Гарантированная герметизация большего зазора и более выгодная цена позволяют сделать конкретный выбор в пользу продукта производства "НИИ Полимеров".

### Заключение

Проведен и обоснован выбор клеевого состава, способного заменить стандартный герметик при герметизации ГБЦ ДВС. На основе сравнения эксплуатационных характеристик и показателей клеевых составов различных марок: LOCTITE, Анатерм было установлено,

что клеевой состав марки Анатерм обладает оптимальным набором, соответствующим заявленным требованиям.

### Библиографический список

1. **Панчехин Д.А., Захарова М.Э.** Усовершенствование технологического процесса обработки вала шестерни путем внедрения в ее конструкцию клеевого соединения // Политехнический молодежный журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2020. Вып. № 2. DOI: 10.18698/2541-8009-2020-2-576.
2. **Иосилевич Г.Б.** Детали машин: учебник для студентов машиностроительных специальных вузов. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.
3. **Онлайн-каталог** торговой марки LOCTITE // Henkel [Электронный ресурс]: URL: <http://henkel-adhesives-selector.ru/bonding/#/substrate?lang=RU&region=easternEurope>.
4. **LOCTITE** [Электронный ресурс]: URL: <http://www.loctite.ru/product-search-3772.htm>.
5. **ФГУП "НИИ Полимеров"** [Электронный ресурс]: URL: <http://www.nicp.ru>.
6. **ООО "Мир клея"** [Электронный ресурс]: URL: <http://www.mirkleya.ru/>
7. **Анатерм** [Электронный ресурс]: URL: <https://анатерм.рф/ru/anaterm-501m/anaterm/anaterm-501m>.



**П.В. Губарев, И.В. Больших**, канд. техн. наук  
(Ростовский государственный университет путей сообщения),  
**В.В. Шабает**  
(Ростовский юридический институт МВД РФ)  
E-mail: pavel.gybarev@yandex.ru

## Анализ существующих диагностических комплексов для контроля уровня вибрации узлов локомотивов

*Проанализированы существующие установки и комплексы, применяемые в локомотивных депо для их диагностики. Предложены новые приборы и технологии. Приведен примерный состав диагностического комплекса.*

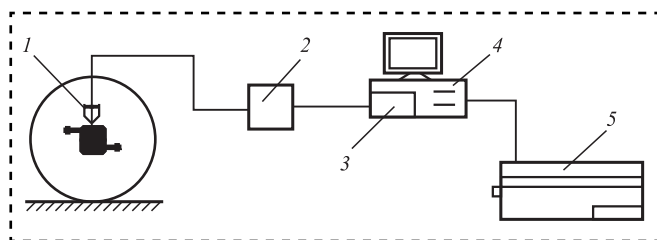
*The existing installations and systems used in locomotive depots for their diagnosis are analyzed. New devices and technologies are proposed. The approximate composition of the diagnostic complex is given.*

**Ключевые слова:** электровоз, диагностика, безопасность, комплекс, прибор, ремонт.

**Keywords:** electric locomotive, diagnostics, safety, complex, instrument, repair.

При диагностике электровозов наиболее важными параметрами, влияющими на безопасность движения, являются параметры работы подшипников качения тяговых двигателей, букс колесных пар и состояния зубчатых передач редукторов колесно-моторных блоков (КМБ) (рис. 1) [1–12].

Проверку КМБ проводят при постановке электровоза на текущий ремонт. Система диагностики построена на анализе спектра амплитуд вибрации верхней точки буксы, куда на время измерений с помощью магнитной прокладки устанавливают датчик вибрации, сигналы которого поступают на интегрирую-



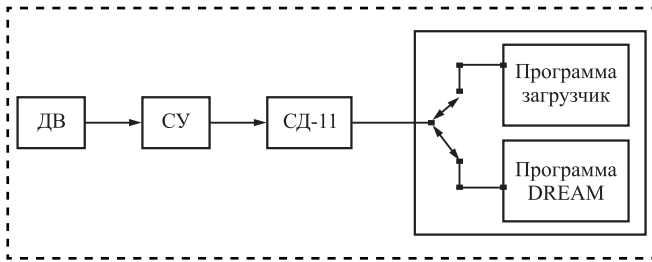
**Рис. 1. Система диагностики КМБ электровозов:**  
1 — датчик вибрации; 2 — усилитель; 3 — АЦП;  
4 — ПЭВМ; 5 — принтер

щий усилитель, а затем, с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП), дискретно в виде отдельных амплитуд, через установленные промежутки времени вводятся в персональный компьютер [13].

Вся полученная в ходе диагностики информация хранится в базе данных. На основе накопленной информации можно получить зависимость числа отказов от пробега и прогнозировать время работы КМБ.

В сервисных локомотивных депо широко используют диагностический комплекс "Вектор 2000" (рис. 2 на стр. 2 обложки). Его основное назначение — диагностика и долгосрочный прогноз состояния узлов вращения, таких как подшипники качения и скольжения, роторы, соединительные муфты, шестерни, ремни, рабочие колеса потокосоздающих агрегатов, электромагнитные системы электрических машин. В депо "Вектор 2000" применяют для контроля и прогноза состояния КМБ и колесно-редукторных блоков локомотива с тяговыми двигателями постоянного тока.

Комплекс включает в себя прибор, обеспечивающий измерение и анализ вибрации,



**Рис. 3. Блок-схема измерительной системы:**

ДВ — датчик вибрации; СУ — согласующий усилитель; СД — сборщик данных

а также программное обеспечение для персонального компьютера, предназначенное для автоматической постановки диагноза и прогноза состояния диагностируемых узлов. В комплексе "Вектор-2000" используется автономный прибор: сборщик данных — анализатор СД-11 [14].

Блок-схема измерительной системы, осуществляющей весь комплекс диагностических измерений и обеспечение функционирования программы DREAM, представлена на рис. 3.

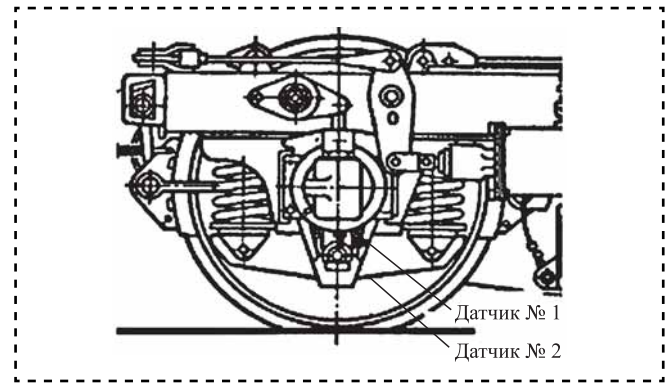
Комплекс оперативной диагностики "Прогноз-1М" (рис. 4 на стр. 2 обложки) предназначен для диагностики и мониторинга технического состояния узлов роторного типа: подшипников качения, механических передач по вибрации, частоте вращения и другим параметрам.

Вибродиагностический комплекс "СМ-3001 — АРМИД" (рис. 5 на стр. 2 обложки) предназначен для диагностики технического состояния колесно-редукторных блоков электропоездов переменного и постоянного токов на базе 3-канального сборщика-анализатора вибросигналов СМ-3001 и программного обеспечения "АРМИД" (рис. 6). Внедрен в 2004 г. в рамках программы ресурсосбережения ОАО "РЖД" по тематике Департамента пригородных пассажирских перевозок.

Данные по результатам внедрения комплекса "СМ-3001 - АРМИД" показали его высокую эффективность выявления опасных дефектов и определения износа узлов при проведении текущих ремонтов и осмотров электропоездов (рис. 7).

Вибродиагностический комплекс депо СМ-3001 имеет большую точность измерений по сравнению с комплексами "Вектор-2000" и "Прогноз-1М" [15].

Система диагностики механизмов ОМСД-02 (одноканальная много-



**Рис. 6. Буксовый узел КРБ электропоезда с установленными на нем вибродатчиками:**

датчик № 1 — вертикальное направление; датчик № 2 — поперечное

функциональная система диагностики) предназначена для измерения среднего квадратического значения виброускорения при диагностике механизмов подвижного состава железнодорожного транспорта (рис. 8 на стр. 2 обложки).

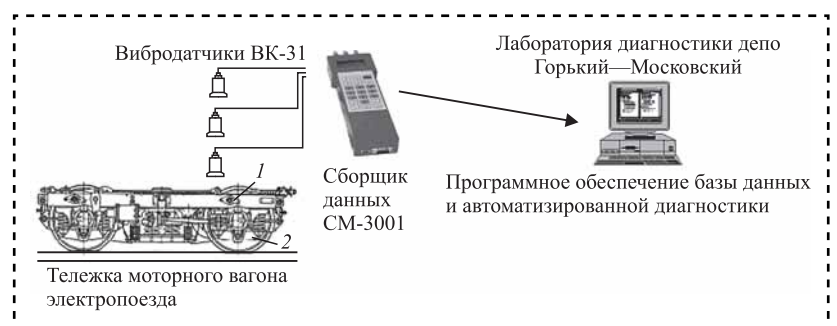
В ОМСД реализован так называемый "японский" метод пооперационного контроля сборочных работ: выполняется не только контроль диагностируемых операций, но и проверка экипажной части локомотива в целом.

ОМСД позволяет выявлять такие сложные дефекты зубчатого колеса и малой шестерни, как неправильный подбор сопрягаемых поверхностей по делительной окружности, односторонний перекося эвольвенты зуба при изготовлении малой шестерни и др.

ОМСД-02 представляет собой информационно-измерительную систему с обменом информации по измерительным каналам (от одного до шестнадцати).

Измерительный канал системы ОМСД-02 включает в себя:

- первичный преобразователь — вибропреобразователь пьезоэлектрический АР 57;
- усилитель заряда ОСА-8;



**Рис. 7. Вибродиагностический комплекс депо**



— линию связи — кабель ПО 084.20.01.000;  
— измерительный прибор системы, состоящий из АЦП L-791, либо L-761 фирмы L-Card, ПЭВМ IBM PC совместимый с установленным программным обеспечением "Вариант 2", работающим в среде Windows.

Сигнал, выдаваемый пьезоэлектрическим вибропреобразователем AP57, по кабелю ПО 084.20.02.000 подается на вход усилителя заряда ОСА-8, где он усиливается и нормируется в величинах напряжения, пропорциональных амплитуде виброускорения. С усилителя заряда по кабелю РК 75-2-11 ПО 084.20.01.000 (длиной до 300 м) напряжение подается на вход АЦП типа L-791 (входящему в состав измерительного прибора системы), где преобразуется в цифровой код и передается на компьютер. В компьютере, под управлением программного обеспечения "Вариант 2", значение цифрового кода преобразуется в среднее квадратическое значение виброускорения и отображается на экране монитора. Опрос каналов, при наличии в составе системы более одного канала, осуществляется последовательно.

### Заключение

Проанализированы существующие установки и комплексы, применяемые в локомотивных депо для их диагностики, а также предложены новые приборы и технологии. Приведен примерный состав диагностического комплекса.

Для сервисных локомотивных депо представлен диагностический комплекс ОМСД-02, который обеспечивает достоверность контроля и может быть рекомендован к применению для перехода на систему ремонта и технического обслуживания подвижного состава с учетом фактического технического состояния.

Внедрение новых комплексов и приборов диагностики позволит выявлять скрытые от визуального контроля дефекты, определять пригодность к эксплуатации узлов и деталей. Это позволит создавать в сервисных локомотивных депо архивы данных испытаний для ранней диагностики неисправностей электровозов.

При проектировании новых локомотивов необходимо предусматривать способы скоростной диагностики (клеммовые выводы, технологические отверстия и др.) совместно с разработчиками диагностических комплексов или обязать разрабатывать эти комплексы непосредственно самим конструкторам в виде бортовой (внутренней) или внешней диагностики. Таким образом, требуется изменение техниче-

ской политики в области локомотивостроения и введение нового регламента на проектирование и постройку современных локомотивов.

### Библиографический список

1. **Гюев З.Г.** Основы виброакустической диагностики тяговых приводов локомотивов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук 05.22.07. Ростов н/Д. 1998.
2. **Осяев А.Т.** Повышение эффективности эксплуатации электровозов методами управления их техническим состоянием: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2002. 48 с.
3. **Майба И.А., Глазунов Д.В.** Диагностика работы гребнерельсосмазывателя при помощи телевизионно-цифрового комплекса // Вестник РГУПС. 2010. № 3 (39). С. 24—29.
4. **Тептиков Н.Р., Резниченко А.А., Губарев П.В., Глазунов Д.В.** Математические методы принятия решений в системах диагностики и управления на тяговом подвижном составе // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 1. Т. 19. С. 13—15.
5. **Резниченко А.А., Чеботарев Е.А., Тептиков Н.Р., Глазунов Д.В.** Оценка безотказности и готовности локомотивов в период нормальной эксплуатации // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3 (39). С. 15—22. DOI: 10.20291/2079-0392-2018-3-15-22.
6. **Kokhanovskii V.A., Glazunov D.V., Zoriev I.A.** Macrocompositional polymer-powder bearings // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. Vol. 48. No. 2. P. 130—135. DOI: 10.3103/S1052618819020080.
7. **Kochanowski V.A., Mayba I.A., Glazunov D.V., Zoriev I.A.** Powder bearings with polymer inserts // Journal of Friction and Wear. 2019. Vol. 40. No. 3. P. 229—233. DOI: 10.3103/S1068366619030048.
8. **Kokhanovskii V.A., Glazunov D.V.** Control of lubricant performance // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. No 9. P. 768—773. DOI: 10.3103/S1068798X17090131.
9. **Kokhanovskii V.A., Glazunov D.V.** Selection of lubricant composition for open contact systems in rolling stock // Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. No. 6. P. 449—451. DOI: 10.3103/S1068798X16060113.
10. **Глазунов Д.В.** Методика исследования трибологических характеристик компонентов смазочного блока, работающего в трибоконтакте "колесо—рельс" // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 3. С. 31—37.
11. **Глазунов Д.В.** Исследование значимости факторов, влияющих на ресурс смазочного материала в паре трения "колесо—рельс" // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 63—65.
12. **Наговицын В.С.** Метод и алгоритм принятия решения о постановке подвижного состава на техническое обслуживание (ремонт) по состоянию // Безопасность движения поездов: тр. IV науч.-практ. конф. М.: МИИТ. 2003. С. 64—69.
13. **Тептиков Н.Р., Уразильдеев Р.Х., Пономарев Д.В.** Диагностические комплексы электроподвижного состава: учеб. пособие. Ростов н/Д.: РГУПС. 2006. 79 с.
14. **Наговицын В.С.** Системы диагностики железнодорожного подвижного состава на основе информационных технологий. М.: ВИНТИ РАН, 2004. 248 с.
15. **Барков А.В., Баркова Н.А., Федорищев В.В.** Вибрационная диагностика колесно-редукторных блоков на железнодорожном транспорте. СПб.: СПбГМТУ, 2002. 103 с.



**И.А. Буяновский**, д-р техн. наук, **В.Д. Самусенко**, канд. техн. наук, **С.С. Пилацкая** (ИМАШ РАН им. А.А. Благонравова),  
**В.А. Левченко**, канд. физ.-мат. наук (МГУ им. М.В. Ломоносова)  
E-mail: buyan@mail.ru

## Исследование влияния характерных смазочных сред на фрикционно-износные характеристики двухслойного покрытия алюминитрид титана + твердый углерод

*Исследовано влияние трех модельных смазочных сред (инактивной, поверхностно-активной и химически активной) на фрикционно-износные характеристики пар трения сталь—сталь, сталь—покрытие алюминитрида титана и сталь—двухслойное покрытие алюминитрид титана + твердое углеродное покрытие. Экспериментально установлены минимальные коэффициенты трения и минимальные диаметры пятна износа для сочетания сталь—двухслойное покрытие алюминитрид титана + твердое углеродное покрытие-ориентант во всех сравниваемых средах.*

*The influence of three model lubricants (inactive, surface-active and chemically active) on the friction-wear characteristics of steel—steel friction pairs, steel—coating of titanium aluminum nitride and steel—two-layer coating of titanium aluminum nitride + hard carbon coating is studied. The minimum coefficient of friction and the minimum diameters of the wear spot were established for the combination of steel—two-layer coating of titanium aluminum nitride + hard carbon coating-orientant in compared media.*

**Ключевые слова:** двухслойное покрытие, твердое углеродное покрытие, алюминитрид титана, фрикционно-износные характеристики, коэффициент трения, диаметр пятна износа, трибологические испытания, инактивная смазочная среда, поверхностно-активная смазочная среда, химически активная смазочная среда.

**Keywords:** two-layer coating, solid carbon coating, titanium aluminum nitride, friction-wear characteristics, friction coefficient, wear scar diameter, tribological tests, inactive lubrication media, surface-active lubrication media, chemically active lubrication media.

### Введение

К настоящему времени установлено, что предварительное нанесение на рабочие поверхности трущихся деталей тонкого слоя особо твердых жаропрочных покрытий типа алюминитрида титана или нитрида титана, а поверх него твердого углеродного покрытия (УП) (например, алмазоподобного) позволяет как увеличить адгезию его к подложке, так и повысить фрикционно-износные характеристики узла трения.

Повышение смазочной способности масел традиционно обеспечивается за счет введения в их состав трибоактивных присадок, содержащих, как правило, химически активные элементы (хлор, серу, фосфор и т.д.). Это приводит к повышенному коррозионно-механическому изнашиванию (особенно — цветных металлов),

а также неблагоприятно влияет на экологию. Повышение содержания трибологически активных присадок в смазочных материалах не перспективно, так как противоречит развиваемой в настоящее время концепции "зеленой трибологии". Альтернативой этому пути является дальнейшее повышение уровня антифрикционных и противоизносных характеристик при помощи модификации поверхностных слоев контактирующих элементов узлов трения: нанесения специальных покрытий на рабочие поверхности контактирующих деталей для обеспечения требуемых трибологических свойств [1].

Лабораторией "Методы смазки машин" ИМАШ РАН совместно с кафедрой коллоидной химии МГУ им. Ломоносова разработана технология нанесения покрытий монокристаллическим углеродом [2]. Однако нанесение УП непо-



средственно на стальные поверхности деталей в ряде случаев не обеспечивает достаточной адгезии между покрытием и подложкой вследствие значительных внутренних напряжений в слое покрытия, поскольку режимы нанесения исследуемого покрытия формируют углеродные пленки, по механическим свойствам близкие к аморфному углероду или к структуре алмаза. Для устранения этого эффекта между УП и стальной поверхностью подложки вводят разделяющий их промежуточный слой: на поверхности детали синтезируют (например, методом динамической металлизации) тонкий слой керамического покрытия, на который уже наносят твердое УП [3, 4]. При этом возникают определенные технологические трудности. Более удачное решение — использование для разделения стальной подложки тонкого слоя сверхтвердого жаропрочного покрытия — например, алюминитрида титана. В качестве функционального покрытия применяют алмазоподобные покрытия, полученные по различным технологиям [5–7]. При трибологическом исследовании в смазочных средах двухслойного покрытия, в котором образование прочного граничного слоя обеспечивал высокоупорядоченный ("монокристаллический") твердый углерод, а адгезию к стальной подложке — алюминитрид титана, наблюдали низкие потери на трение и отсутствие нарушения адгезии покрытия к подложке [8].

**Цель работы** — установление влияния смазочного материала на фрикционно-износные характеристики исследуемых твердых покрытий при трении по стали в среде характерных смазочных материалов и при отсутствии смазочного материала.

Исследование включает оценку антифрикционных и противоизносных характеристик при трении стали по стали, по стали с покрытием алюминитридом титана и стали с покрытием алюминитридом титана и поверх него УП. Испытания проводили без смазочного материала, в среде инактивного смазочного материала, в поверхностно-активной среде и в химически активной среде.

#### **Методика проведения эксперимента и полученные результаты**

Использовали три модельные смазочные среды: инактивное синтетическое масло ПАО-4; масло ПАО-4 с поверхностно-активной присадкой олеиновой кислоты (ОК) с массовой долей 1 %;

масло ПАО-4 с массовой долей 2 % дитиофосфатной присадки ДФ-11.

Исследовали влияние этих смазочных сред на фрикционно-износные характеристики пар трения — сталь по стали, сталь по твердому УП, сталь по стали с покрытием алюминитридом титана и сталь по двухслойному покрытию (твердый углерод поверх алюминитрида титана, нанесенного на сталь).

Антифрикционные и противоизносные характеристики исследуемых смазочных материалов оценивали на лабораторной установке КТ-2 по схеме трения "вращающийся шар — три ролика" с применением измененной конструкции оправки [9, 10]. В качестве трущихся тел использовали стандартные детали подшипников качения, имеющие постоянные состав и структуру, постоянные тщательно контролируемые физико-механические характеристики и микрогеометрию поверхности: шарики диаметром 12,7 мм из стали ШХ15 и ролики диаметром и длиной 8 мм из стали 100Cr6.

На первом этапе на цилиндрические поверхности роликов наносили слой алюминитрида титана вакуумно-дуговым методом (PVD-технология), используя мишени титана и алюминия с чистотой 99,99. Обрабатываемые ролики помещали в вакуумную камеру установки, оснащенной электродуговыми испарителями и нагревателем, затем очищали обрабатываемые поверхности роликов в два этапа: в тлеющем разряде при бесконтактном нагреве поверхности до 100 °С и ионной очисткой электродуговым испарителем в среде аргона (при нагреве поверхности до 300...350 °С). После этого наносили многослойное покрытие алюминитрида титана, а поверх него — покрытие углерода толщиной 1,0...1,5 мкм импульсной конденсацией углеродной плазмы в сочетании с дополнительным облучением ионами  $Ag^+$  [10].

Определяли физико-механические характеристики поверхностных слоев: твердость и модуль упругости на нанотвердометре "НаноСкан-4D". Максимальная сила нагружения — 10 мН (ГОСТ Р 8.748—2011). В качестве индентора использовали трехгранную пирамиду Берковича. Время нагружения и разгружения — 10 с.

Показано, что нанотвердость образцов с УП выше примерно в 4 раза, чем у стали, и примерно в 2 раза выше, чем у алюминитрида титана (таблица).

Параметры микрогеометрии поверхностных слоев образцов оценивали на оптическом профилетре S neox по профилю длиной 100 мкм вдоль образующей.

Нанесение на сталь покрытия алюминитрида титана практически не влияет на уровень шероховатости покрытия, но нанесение на это покрытие слоя твердого углерода существенно сглаживает поверхность, что может оказать вли-



### Физико-механические характеристики исследуемых образцов

Образец	Твердость Н, ГПа	Модуль упругости $E$ , ГПа	Средний параметр шероховатости $Ra$ , мкм
Сталь 100Cr6	$9,4 \pm 1,5$	$250 \pm 31$	0,86
AlTiN	$18,0 \pm 2,4$	$264 \pm 40$	0,80
AlTiN+УП	$41 \pm 9$	$440 \pm 80$	0,57

яние на трибологические характеристики исследуемого узла трения.

Модернизированный узел трения машины КТ-2, на котором исследовали влияние смазочных материалов на фрикционно-износные свойства покрытий, приведен на рис. 1 (на стр. 3 обложки).

Шпиндель машины 1 с зажатым в нем шариком под осевой нагрузкой 108 Н прижимается к роликам, сложенным равносторонним треугольником, установленным в оправке 3, которая, в свою очередь, установлена в масляной чаше 2. Таким образом, между шариком и каждым из роликов реализуется начальный точечный контакт. Исследуемое масло наливают в масляную чашу 2 так, чтобы уровень масла превышал уровень места контакта не менее чем на 2,5 мм. Частота вращения шпинделя —  $1 \text{ мин}^{-1}$ , что в сочетании с высоким давлением в контакте обеспечивает граничный режим смазки. Продолжительность каждого испытания при заданной нагрузке — 60 мин. Каждый эксперимент повторяли не менее трех раз.

В процессе испытания регистрировали момент трения; после окончания испытания измеряли пятна износа, вытертые за это время на роликах. Поскольку пятно износа на ролике имеет форму эллипса, для оценки противоизносных свойств трущихся тел использовали приведенный диаметр пятна износа  $D_{\text{пр}}$ :

$$D_{\text{пр}} = 2(ab)^{1/2},$$

где  $a$  и  $b$  — малая и большая полуоси эллипса, вытертого вращающимся шариком на поверхности ролика.

Результаты оценки антифрикционных свойств исследованных сочетаний смазочных сред и материалов контактирующих тел (а также без смазочной среды) представлены на рис. 2 (на стр. 3 обложки) в виде зависимостей коэффициентов трения от продолжительности испытаний.

Смазочные материалы оказывают заметное влияние на антифрикционные характеристики исследуемых пар трения. Наиболее значительно это влияние применительно к трению стали по стали (рис. 2, а). Если при трении стали по стали без смазочного материала ("сухое трение") коэффициент установившегося

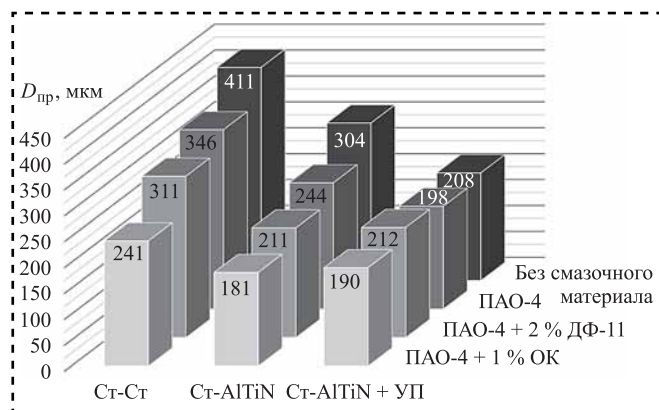
трения составляет 0,82...0,87 (кривая 1), то даже инертное масло ПАО-4 снижает коэффициент трения до 0,50...0,47 (кривая 2), а добавление в это же масло химически активной присадки ДФ-11 снижает коэффициент трения до 0,26 (кривая 4). Минимальный коэффициент при трении стали по стали получен в среде раствора олеиновой кислоты в том же масле — 0,16...0,17 (кривая 3).

Несколько иначе влияет состав смазочного материала при трении стали по роликам с покрытием алюмонитрида титана (см. рис. 2, б). На коэффициент трения без смазочного материала нанесение на рабочие поверхности роликов алюмонитрида титана практически не влияет по сравнению с трением стали по стали, что является следствием разрушения покрытия. Однако наличие масла ПАО-4 обеспечило существенное снижение коэффициента трения — до 0,27...0,28. В смазочной среде ПАО-4 + 2 % ДФ-11 начиная с 25-й минуты испытаний происходит постепенное снижение коэффициента трения, что является результатом трибохимической реакции присадки с поверхностью. Минимальное значение коэффициента трения при трении стали по данному покрытию получено в среде раствора олеиновой кислоты в том же инертном масле — 0,17...0,18.

При трении стали по двухслойному покрытию (см. рис. 2, в) коэффициенты трения во всех сравниваемых средах разместились в узком интервале 0,098...0,12 практически на всем протяжении испытаний, исключая первые 10 мин приработки.

На рис. 3 представлена в виде гистограммы зависимость приведенных диаметров пятен износа роликов из стали 100Cr6 как без покрытия, так и с покрытием алюмонитрид титана, а также с двухслойным покрытием AlTiN + УП от состава исследуемой смазочной среды (инертного масла ПАО-4, масла ПАО-4 с присадками 1 % ОК и 2 % ДФ-11).

Применение смазочных материалов оказывает заметное влияние на противоизносные характеристики исследуемых образцов как без покрытия, так и с покрытием, хотя уровень этого влияния в значительной степени зависит как от состава смазочной среды, так и от состава покрытия. Так, при отсутствии смазочного материала для пары трения сталь—сталь приведенный диаметр пятна износа составляет 411 мкм, в среде масла ПАО-4 — 346 мкм, ПАО-4 + 2 % ДФ-11 — 311 мкм, ПАО-4 + 1 % ОК — 241 мкм. Такой же характер имеет изменение диаметра пятна износа при переходе к трению стали по стальному ролику с покрытием алюмонитрида титана — без смазочного материала износ стального ролика — 304 мкм, в масле ПАО-4 — 244 мкм, ПАО-4 + 2 % ДФ-11 — 181 мкм. При трении стали по ролику с двухслой-



**Рис. 3.** Влияние смазочного материала (и его отсутствия) на приведенные диаметры пятен износа  $D_{пр}$  стали 100Cr6, ее же с покрытием алюминитрид титана и с двухслойным покрытием при трении по стали ШХ15

ным покрытием-ориентантом соотношение размеров приведенных диаметров пятен износа с изменением состава смазочного материала приобретает другой характер. Здесь при трении без смазочного материала износ составляет 205 мкм, при трении в среде ПАО-4 — 198 мкм, ПАО-4 + 2 % ДФ-11 — 212 мкм, ПАО-4 + 1 % ОК — 190 мкм, т.е. различие между сравниваемыми приведенными диаметрами пятен износа находится в пределах разброса результатов эксперимента.

### Заключение

Анализ результатов трибологических экспериментов позволяет предположить, что основной вид взаимодействия смазочных сред с поверхностями трения — образование на этих поверхностях граничных слоев адсорбционного происхождения, которые обеспечивают минимизацию участков непосредственного контакта трущихся тел и облегчение сдвиговых деформаций вследствие реализации эффекта Ребиндера [11].

Олеиновая кислота является достаточно мощным поверхностно-активным агентом, и поэтому ее использование снижает трение и уменьшает износ по сравнению с трением в среде чистого масла, что характеризуется уменьшением приведенных диаметров пятен износа на исследуемых роликах без покрытия и с покрытием алюминитрид титана.

При данных условиях испытаний химическая активность серофосфорсодержащей присадки ДФ-11 для пар трения сталь по стали и сталь по покрытию AlTiN не проявляется. По-видимому, снижение трения и уменьшение износа по сравнению с испытанием в чистом масле ПАО-4 объясняется поверхностной активностью присадки ДФ-11.

Углеродное покрытие снижает и потери на трение, и износ независимо от присутствия других факторов. Данное покрытие обеспечивает

высокие трибологические свойства поверхности как при трении в смазочных средах, так и при трении в сухую. Основная роль смазочных сред в этом случае — минимизация сильного повреждения покрытия и его разрушения в дальнейшем за счет образования прочного граничного слоя, состоящего из молекул смазочной среды.

Причины высоких трибологических свойств двухслойного покрытия алюминитрид титана + УП:

- высокая твердость рабочих поверхностей;
- значительное выглаживание поверхностей роликов при нанесении на алюминитрид титана слоя УП;
- графитизация тончайшего поверхностного слоя УП.

### Библиографический список

1. Левченко В.А., Буяновский И.А., Большаков А.Н., Матвеев В.Н. Зеленая трибология: свойства углеродных алмазоподобных покрытий деталей трибологических узлов в смазочных средах (обзор) // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92. № 12. С. 1499—1513.
2. Развитие исследований влияния углеродных алмазоподобных покрытий на смазочную способность масел / И.А. Буяновский и др. // Механизация строительства. 2014. № 5 (839). С. 53—56.
3. Буяновский И.А., Большаков А.Н., Левченко В.А., Матвеев В.Н. Влияние смазочных масел на трение стали по композиционному покрытию керамика + монокристаллический углерод // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 2. С. 173—177.
4. Lorenzo-Martin C. et al. Friction and wear behavior of thin-film ceramic coatings under lubricated sliding contact // Thin solid films. 2014. Vol. 569. P. 70—75.
5. Sulaiman M.H., Farahana R.N., Blenk K. et al. Effect of DLC/TiAlN-coated die on friction and wear in Sheet-metal forming under dry and oil-lubricated conditions: Experimental and numerical studies // Wear. 2019. Vol. 438—439. No. 203040. P. 1—10.
6. Антифрикционные свойства алмазоподобного покрытия и алюминитрида титана в модельных смазочных средах / В.А. Левченко и др. // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 6. С. 128—132.
7. Haque T., Morina A., Neville A. et al. Effect of Oil Additives on the Durability of Hydrogenated DLC Coating under Boundary Lubrication Conditions // Wear. 2009. Vol. 266. No. 1—2. P. 147—157.
8. Pang X., Yang H., Gao K. et al. AlTiN Layer Effect on Mechanical Properties of Ti-Doped Diamond Like Carbon Composite Coatings // Thin Solid Films. 2011. Vol. 519. No. 16. P. 5353—5357.
9. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: справочник / Р.М. Матвеевский и др. М.: Машиностроение. 1989. 224 с.
10. Буяновский И.А., Большаков А.Н., Самусенко В.Д., Левченко В.А. Методика трибологических испытаний тонких твердых покрытий стальных деталей на четырехшариковой машине // Тр. НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: Инженерная механика, материаловедение и надежность оборудования. Новомосковский институт (филиал). 2016. С. 3—6.
11. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы: методы получения и свойства. Екатеринбург: УрО РАН. 1998. 200 с.
12. Буяновский И.А. Граничная смазка адсорбционным слоем // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 1. С. 48—67.



Б.М. Эрлих, канд. техн. наук (ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН)

E-mail: uliaerlich@mail.ru

## Система с двумя степенями свободы в задаче гашения фрикционных колебаний с учетом нелинейностей пассивных сил

*Рассмотрена актуальная задача гашения фрикционных колебаний с учетом нелинейностей пассивных сил в системе с двумя степенями свободы. В качестве активного воздействия при гашении колебаний использовали одновременно два силовых воздействия специальной структуры, обеспечивающих устойчивые колебания меньшей интенсивности. Расчеты подтверждают эффективность предлагаемого решения рассматриваемой задачи.*

*The actual problem of damping frictional oscillations taking into account the nonlinearities of passive forces in a system with two degrees of freedom is considered. As an active influence during vibration damping two power impacts of a special structure are used simultaneously, providing steady fluctuations of lower intensity. The calculation confirm the effectiveness of the proposed solution to the problem under consideration.*

**Ключевые слова:** гашение фрикционных колебаний, нелинейности пассивных сил, система с двумя степенями свободы, устойчивость колебаний, силовое воздействие, интегральная интенсивность воздействий, эффективность решения задачи.

**Keywords:** damping of frictional oscillations, nonlinearity of passive forces, system with two degrees of freedom, stability of oscillations, power impact, integral intensity of the impacts, efficiency of solving the problem.

Рассмотрим систему с двумя степенями свободы с фрикционными колебаниями в двух направлениях [1–3].

Для решения задачи гашения колебаний с учетом нелинейностей пассивных сил в систему введем два виброгасящих силовых воздействия специальной структуры, обеспечивающих устойчивые колебания меньшей интенсивности.

Для учета динамики колебаний система двух дифференциальных уравнений имеет общий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \omega_0 x + \mu \dot{x} - F_1(y) = u_x; \\ \ddot{y} + \omega_1 y + \mu_1 \dot{y} - F_2(\dot{x}) = u_y, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  — коэффициенты линейной жесткости по направлениям  $x$ ,  $y$ ;

$\mu$ ,  $\mu_1$  — коэффициенты линейного демпфирования по направлениям  $x$ ,  $y$ ;

$F_1(y)$  — функция нелинейной составляющей пассивных сил, отражающая воздействие направления  $y$  на направление  $x$ ;

$F_2(\dot{x})$  — функция нелинейной составляющей пассивных сил, отражающая воздействие направления  $x$  на направление  $y$ ;

$u_x$ ,  $u_y$  — законы виброгасящих силовых воздействий по направлениям  $x$ ,  $y$ .

Для расчета двумерных колебаний, описываемых системой (1), используем формулы:

$$\begin{cases} F_1(y) = n_1 y + n_2 y^2 + n_3 y^3 + n_4 y^4; \\ F_2(\dot{x}) = k_1 \dot{x} + k_2 \dot{x}^2 + k_3 \dot{x}^3 + k_4 \dot{x}^4, \end{cases} \quad (2)$$

где  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$  — коэффициенты аппроксимации нелинейности  $F_1(y)$ ;

$k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  — коэффициенты аппроксимации нелинейности  $F_2(\dot{x})$ .

Формулы (2) в реальных задачах определяют коэффициенты аппроксимации  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ,  $n_4$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$ .

Разработаны два наиболее эффективных варианта законов виброгасящих силовых воздействий по направлениям  $x$ ,  $y$  с параметром  $\rho$ :

вариант 1, единица измерения параметра  $\rho$  —  $c/m^2$ :

$$\begin{cases} u_x = -\rho(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)\dot{x}; \\ u_y = -\rho(\dot{x}^2 + \dot{y}^2)\dot{y}, \end{cases} \quad (3)$$

вариант 2, единица измерения параметра  $\rho - 1/(m^2 \cdot c)$ :

$$\begin{cases} u_x = -\rho(x^2 + y^2)\dot{x}; \\ u_y = -\rho(x^2 + y^2)\dot{y}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\rho = 0$  — отсутствует воздействие;

$\rho > 0$  — активное силовое воздействие.

Задача гашения фрикционных колебаний с учетом нелинейностей пассивных сил сводится к решению системы (1)–(4). Далее на рисунках приведены результаты расчетов решения задачи гашения фрикционных колебаний, учитывающих наличие нелинейностей

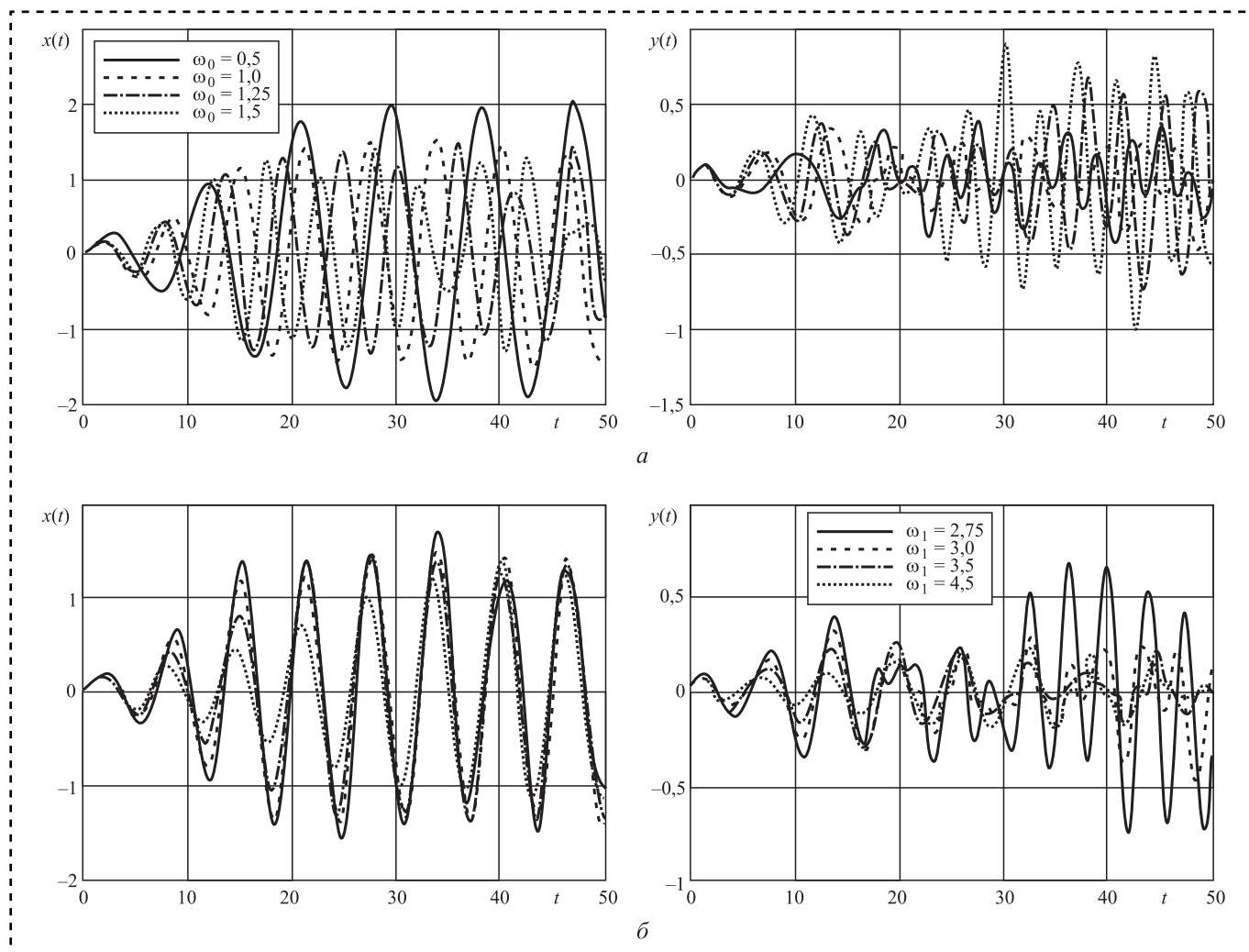
пассивных сил в системе с двумя степенями свободы.

Результаты получены при следующих значениях расчетных коэффициентов функций  $F_1(y)$ ,  $F_2(\dot{x})$ :

1)  $\mu = \mu_1 = 0,1$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $n_3 = n_4 = 0$ ;  $k_1 = 1$ ;  $k_3 = -0,5$ ;  $k_2 = k_4 = 0$  [3];

2)  $\mu = \mu_1 = 0,1$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $n_3 = -0,5$ ;  $n_4 = 0,1$ ;  $k_1 = 1$ ;  $k_2 = 0,5$ ;  $k_3 = -0,5$ ;  $k_4 = 0,1$ .

На рис. 1 при отсутствии силового воздействия представлены графики траекторий колебаний  $x(t)$ ,  $y(t)$  по направлениям  $x$ ,  $y$  за время  $T = 50$ . Варьировали коэффициенты линейной жесткости  $\omega_0$ ,  $\omega_1$ . Диапазоны варьирования



**Рис. 1.** Траектории колебаний  $x(t)$ ,  $y(t)$  при варьировании коэффициентов жесткости ( $\mu = \mu_1 = 0,1$ ;  $k_1 = 1$ ;  $k_2 = 0$ ;  $k_3 = -0,5$ ;  $k_4 = 0$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $n_3 = n_4 = 0$ ):  
 а —  $\omega_0 = 0,5 \dots 1,5$ ;  $\omega_1 = 3$ ; б —  $\omega_1 = 2,75 \dots 4,5$ ;  $\omega_0 = 1$



коэффициентов жесткости  $\omega_0$ ,  $\omega_1$  выбраны с учетом возможности попадания двумерных колебаний в области высокой интенсивности и неустойчивости. При  $\omega_0 > 1,5$  и  $\omega_1 < 2,75$  амплитуды колебаний по направлению резко возрастают и система переходит в неустойчивый режим.

Оценку влияния законов виброгасящих силовых воздействий по направлениям  $x$ ,  $y$  с параметром  $\rho$  проводили по трем параметрам:

$A_{mx}$  — максимальная фактическая амплитуда колебаний по направлению  $x$ ;

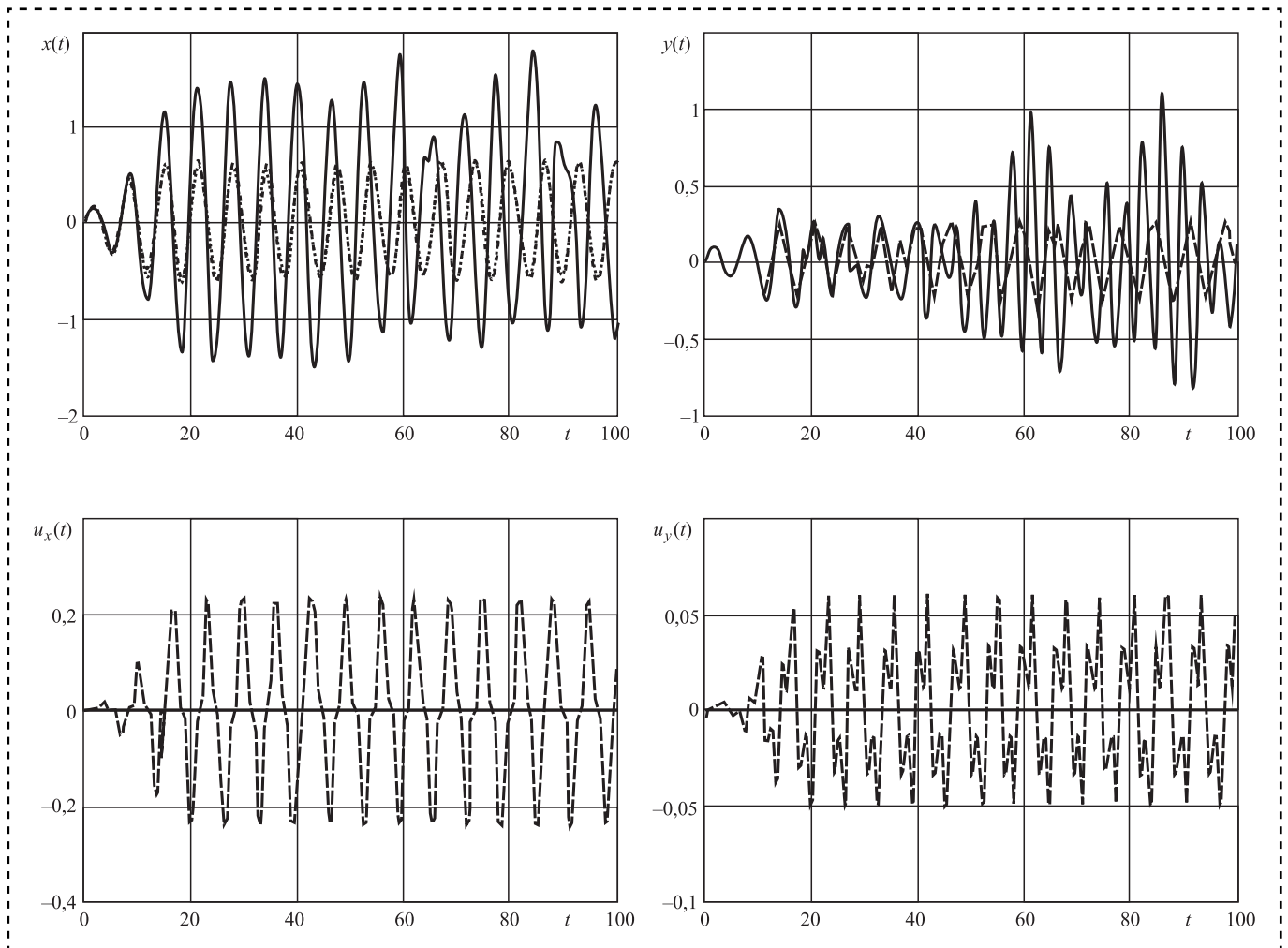
$A_{my}$  — максимальная фактическая амплитуда колебаний по направлению  $y$ ;

$I$  — суммарная интегральная интенсивности силовых воздействий  $u_x$ ,  $u_y$  за время  $T$ ,

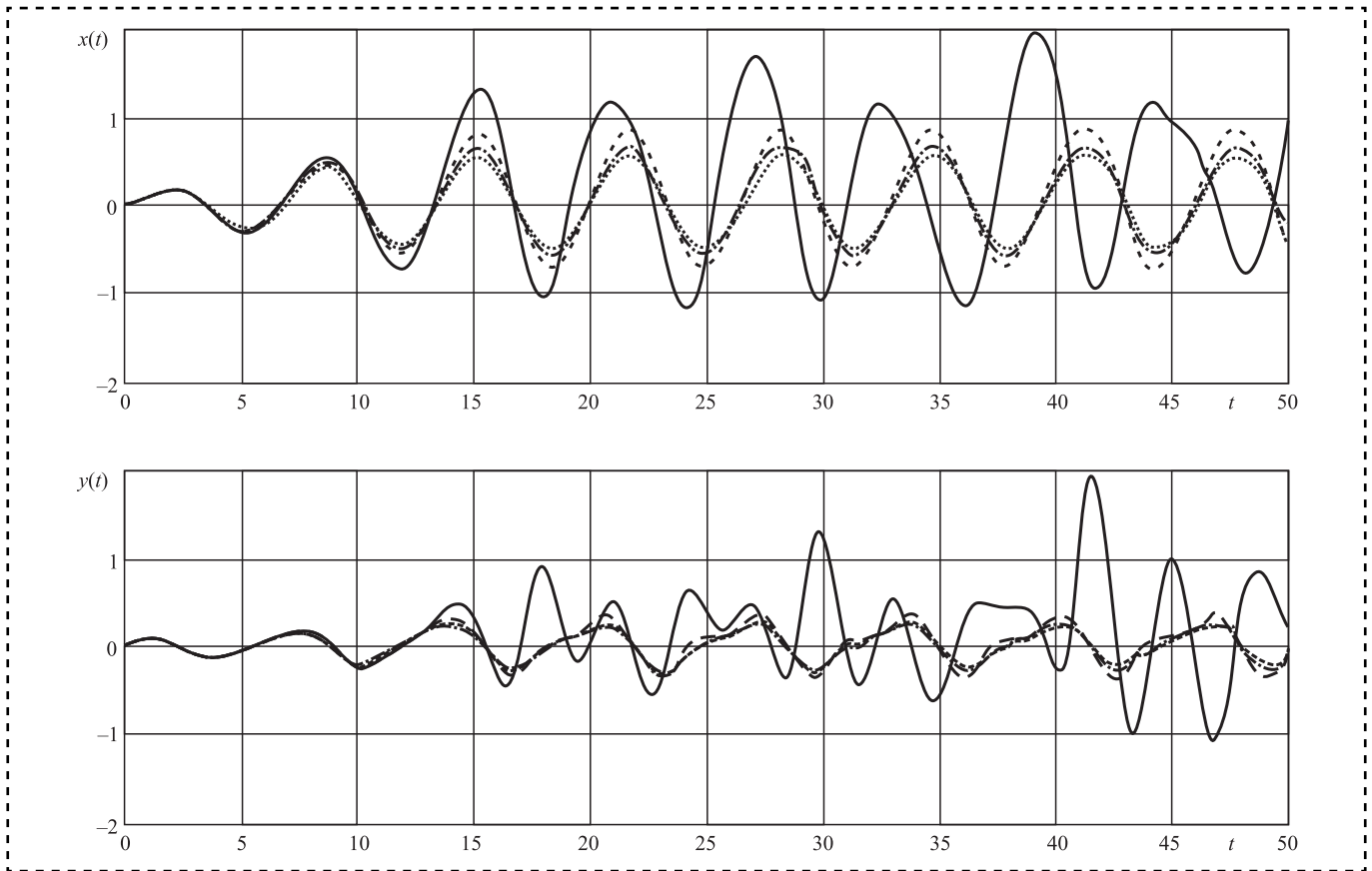
$$I = \int_0^T (u_x^2 + u_y^2) dt. \quad (5)$$

Значения  $A_{mx}$  и  $A_{my}$  определяли в процессе интегрирования системы (1)–(5) путем сравнения по модулю текущих амплитуд.

На рис. 2 представлены при использовании варианта 1 силового воздействия графики по направлениям  $x$ ,  $y$  траекторий колебаний  $x(t)$ ,  $y(t)$  и законов силового воздействия  $u_x(t)$ ,  $u_y(t)$ . При расчетах использовали первый набор коэффициентов функций  $F_1(y)$ ,  $F_2(\dot{x})$  и коэффициенты жесткости  $\omega_0 = 1$  и  $\omega_1 = 3$ .



**Рис. 2.** Решение системы дифференциальных уравнений (1)–(5) при  $\rho = 0 \dots 1,5$ , суммарными показателями  $A_{mx}$ ,  $A_{my}$  и  $I$  за время  $T = 100$  с ( $\omega_0 = 1$ ;  $\mu = \mu_1 = 0,1$ ;  $\omega_1 = 3$ ;  $k_1 = 1$ ;  $k_2 = 0$ ;  $k_3 = -0,5$ ;  $k_4 = 0$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $n_3 = n_4 = 0$ ):  
 —  $\rho = 0$ ;  $I = 0$ ;  $A_{mx} = 1,8101$ ;  $A_{my} = 1,1016$ ; - - -  $\rho = 1$ ;  $I = 1,8381$ ;  $A_{mx} = 0,6603$ ;  $A_{my} = 0,2616$ ; - · - · -  $\rho = 1,5$ ;  
 $I = 1,4499$ ;  $A_{mx} = 0,5548$ ;  $A_{my} = 0,2281$



**Рис. 3.** Решение системы дифференциальных уравнений (1)–(5) при  $\rho = 0 \dots 1,5$  с расчетными суммарными показателями  $A_{mx}$ ,  $A_{my}$  и  $I$  ( $\omega_0 = 1$ ;  $\omega_1 = 3$ ;  $\mu = \mu_1 = 0,1$ ;  $k_1 = 1$ ;  $k_2 = 0,5$ ;  $k_3 = -0,5$ ;  $k_4 = 0,1$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $n_3 = -0,5$ ;  $n_4 = 0,1$ ): —  $\rho = 0$ ;  $I = 0$ ;  $A_{mx} = 1,9615$ ;  $A_{my} = 1,9097$ ; - - -  $\rho = 0,5$ ;  $I = 1,0029$ ;  $A_{mx} = 0,8896$ ;  $A_{my} = 0,3544$ ; - · - · -  $\rho = 1$ ;  $I = 0,8105$ ;  $A_{mx} = 0,6863$ ;  $A_{my} = 0,2775$ ; - - -  $\rho = 1,5$ ;  $I = 0,6532$ ;  $A_{mx} = 0,5762$ ;  $A_{my} = 0,2364$

При использовании силовых воздействий максимальные фактические амплитуды колебаний по обоим направлениям могут быть снижены по направлению  $x$  в 3,3 раза, а по направлению  $y$  — в 4,8 раза. Значительное гашение колебаний достигается за счет интенсивности силовых воздействий.

На рис. 3 представлены при использовании варианта 1 силового воздействия графики траекторий колебаний  $x(t)$ ,  $y(t)$  по направлениям  $x$ ,  $y$  для второго сложного набора коэффициентов функций  $F_1(y)$ ,  $F_2(\dot{x})$ .

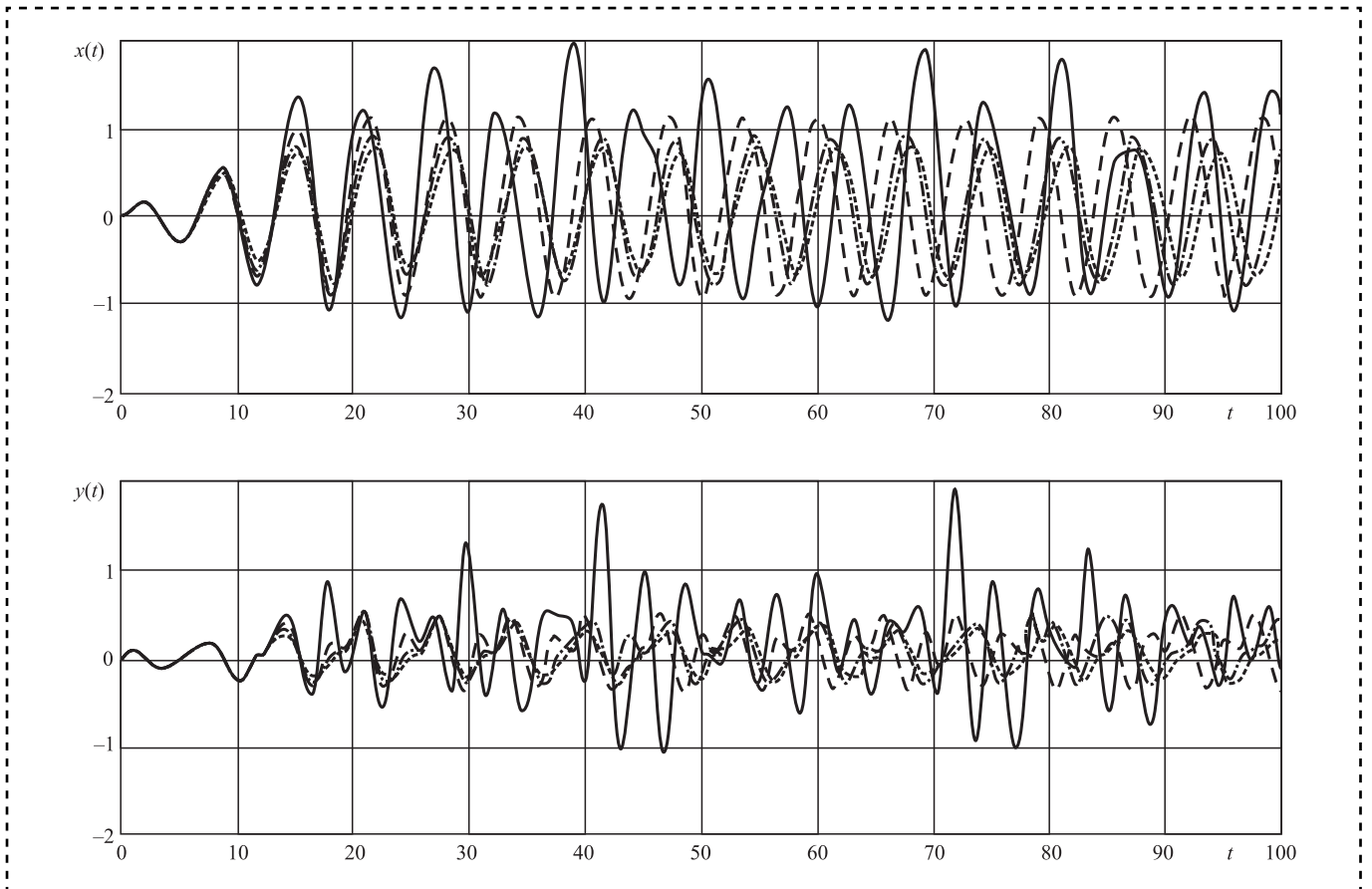
Сравнение двух наборов коэффициентов функций  $F_1(y)$ ,  $F_2(\dot{x})$  (см. рис. 2 и 3) показывает, что по-прежнему наблюдается значительный эффект гашения колебаний. Максимальные фактические амплитуды колебаний могут быть снижены по направлению  $x$  в 3,4 раза, а по направлению  $y$  — в 8 раз.

При использовании варианта 2 силового воздействия и второго сложного набора коэффициентов максимальные фактические амплитуды колебаний могут быть снижены по направлению  $x$  в 2,6 раза, а по направлению  $y$  — в 5,3 раза, что примерно в 1,4 раза менее эффективно, чем использование варианта 1 (рис. 4).

Эффективность силового воздействия варианта 1 оказалась выше, чем у варианта 2. Поэтому на двух последующих рисунках показаны итоговые результаты гашения фрикционных колебаний в системе с двумя степенями свободы с использованием варианта 1 силового воздействия и второго сложного набора коэффициентов функций нелинейностей.

На рис. 5 представлены итоговые зависимости фактических значений по направлениям  $x$ ,  $y$  максимальной амплитуды колебаний





**Рис. 4.** Решение системы дифференциальных уравнений (1)–(5) с применением варианта 2 силового воздействия при  $\omega_0 = 1$ ;  $\omega_1 = 3$ ;  $\mu = \mu_1 = 0,1$ ;  $k_1 = 1$ ;  $k_2 = k_3 = -0,5$ ;  $k_4 = 0,1$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $n_3 = -0,5$ ;  $n_4 = 0,1$ :  
 —  $\rho = 0$ ;  $I = 0$ ;  $A_{mx} = 1,9615$ ;  $A_{my} = 1,9097$ ; - - -  $\rho = 0,5$ ;  $I = 3,4598$ ;  $A_{mx} = 1,0998$ ;  $A_{my} = 0,484$ ; - · - · -  $\rho = 1$ ;  $I = 4,0216$ ;  $A_{mx} = 0,8918$ ;  $A_{my} = 0,4129$ ; · · · ·  $\rho = 1,5$ ;  $I = 3,5341$ ;  $A_{mx} = 0,7574$ ;  $A_{my} = 0,3571$

$A_x(\rho)$ ,  $A_y(\rho)$  и интегральной интенсивности силовых воздействий  $I(\rho)$  при  $\rho = [0...2]$  и  $\omega_0 = = [0,75...1,5]$ .

В рассматриваемом диапазоне изменения коэффициента линейной жесткости  $\omega_0$  при увеличении интенсивности воздействия с параметром  $\rho$  от 0 до 2 наблюдали постоянное снижение максимальных значений амплитуды колебаний  $A_x$ ,  $A_y$ , причем колебания для всех варьируемых значений  $\omega_0$  происходят по близким траекториям. Темп гашения колебаний при малых значениях параметра  $\rho$  значительный, а при более высоких — незначительный. Снижение максимальных значений амплитуды колебаний по направлению  $x$  в 3 раза, а по направлению  $y$  — в 7 раз.

Однако при некоторых постоянных значениях коэффициентов системы (1)–(5) ампли-

туды колебаний при отсутствии силового воздействия ( $\rho = 0$ ) резко возрастают и система переходит в неустойчивый режим. На рис. 5 неустойчивый режим наблюдается при коэффициенте линейной жесткости  $\omega_0 > 1,5$ .

На рис. 6 показано, что при полном совпадении набора исходных данных с рис. 5, применяя силовое воздействие ( $\rho > 0,1$ ), удается избежать перехода в неустойчивый режим при существенном расширении диапазона изменения коэффициента линейной жесткости  $\omega_0$ . Применение силового воздействия позволило преодолеть неустойчивый режим при  $\omega_0 > 1,5$ .

Повышение параметра  $\rho$  силового воздействия до  $\rho \approx 0,4$  происходит с естественным ростом интегральной интенсивности, а при условии  $\rho > 0,4$  в связи со значительным уменьшением амплитуд  $A_x$ ,  $A_y$  наблюдается ее падение.

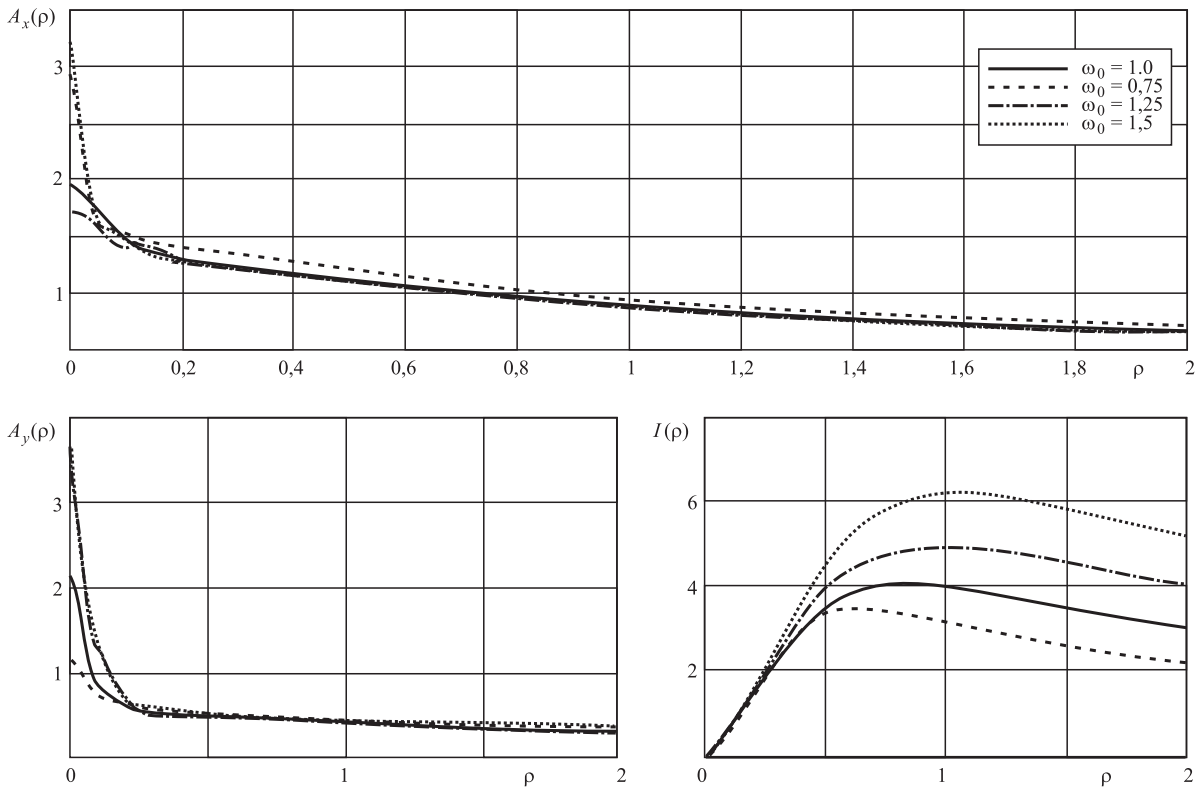


Рис. 5. Результаты численного расчета показателей  $A_x(\rho)$ ,  $A_y(\rho)$  и  $I(\rho)$  с использованием варианта 1 силового воздействия ( $\mu = \mu_1 = 0,1$ ;  $\omega_1 = 3$ ;  $k_1 = 1$ ;  $k_2 = 0,5$ ;  $k_3 = -0,5$ ;  $k_4 = 0,1$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $n_3 = -0,5$ ;  $n_4 = 0,1$ )

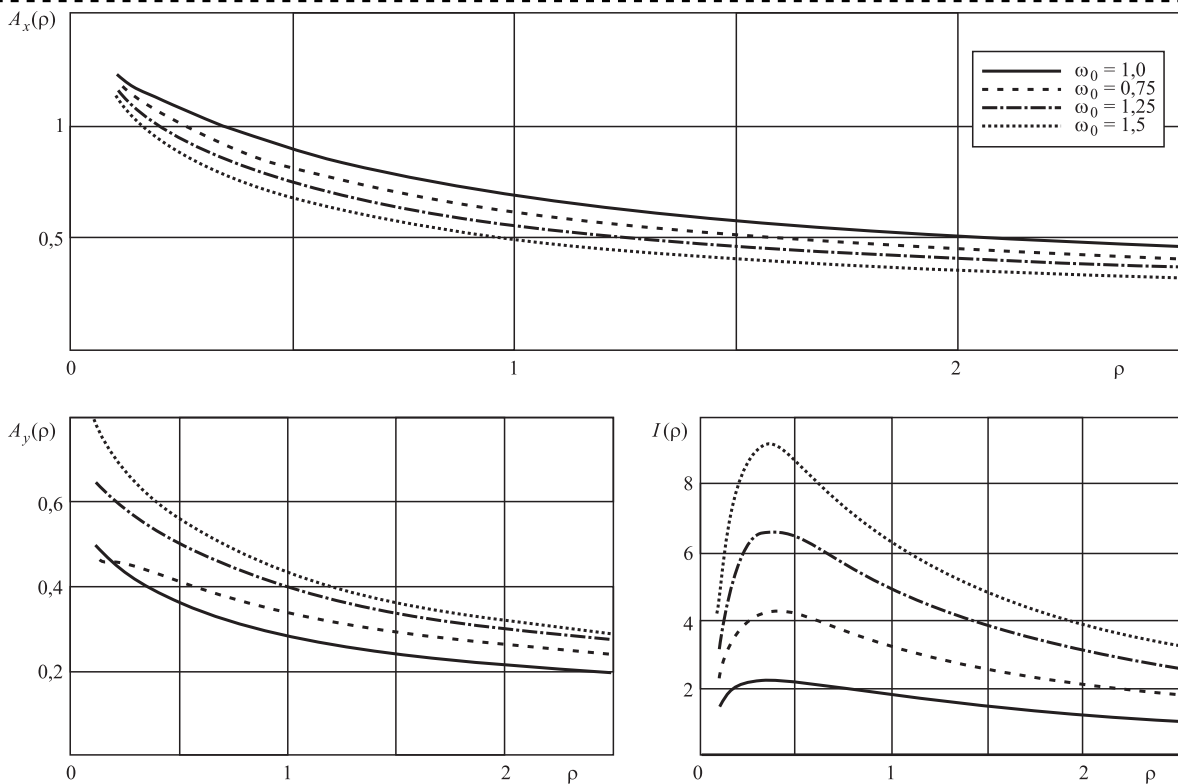


Рис. 6. Результаты численного расчета показателей  $A_x(\rho)$ ,  $A_y(\rho)$  и  $I(\rho)$  с использованием силового воздействия с более широким диапазоном изменения коэффициента жесткости  $\omega_0$  ( $\mu = \mu_1 = 0,1$ ;  $\omega_1 = 3$ ;  $k_1 = 1$ ;  $k_2 = 0,5$ ;  $k_3 = -0,5$ ;  $k_4 = 0,1$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 0,5$ ;  $n_3 = -0,5$ ;  $n_4 = 0,1$ )



## Заключение

Рассмотрена система с двумя степенями свободы в задаче гашения фрикционных колебаний с учетом нелинейностей пассивных сил. В качестве активного воздействия при гашении колебаний использовали одновременно два силовых воздействия специальной структуры. Функция нелинейностей пассивных сил позволяет в реальных задачах провести расчеты гашения двумерных колебаний.

Все приведенные результаты расчетов подтверждают работоспособность предлагаемого метода решения поставленной задачи.

## Библиографический список

1. Израилович М.Я. Активное виброгашение вынужденных квазигармонических колебаний нелинейных систем. М.: URSS, 2010. 170 с.
2. Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Активное гашение периодических колебаний в системах с нелинейным демпфированием. М.: Спутник, 2015. 38 с.
3. Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Гашение фрикционных колебаний автоколебаний с учетом двух направлений колебаний инструмента // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 12. С. 38–40.

УДК 621.787

DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-7-331-336

А.В. Щедрин, канд. техн. наук, А.А. Бекаев, канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана),  
Н.Ю. Чихачёва (Академия проблем качества, СОШ № 1, г. Покров)  
E-mail: bekaev@list.ru

## Влияние характеристик поверхностного слоя инструмента и состава технологической смазки на коэффициент трения в методах комбинированного дорнования отверстий

*С использованием теоретических положений адгезионно-деформационной теории трения сравнительно исследовано влияние характера и параметров микрогеометрии поверхностного слоя инструмента на коэффициент трения скольжения в методах комбинированного дорнования отверстий в условиях применения металлоплакирующих смазок, реализующих эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского.*

*The influence of the nature and parameters microgeometry of the surface layer tool on the sliding friction coefficient in the combined methods opening under the conditions of using metal-coating lubricants, which implement the effect of wear-free friction of Garkunov—Kragelsky, is studied comparatively using the theoretical provisions of the adhesive-deformation theory of friction.*

**Ключевые слова:** регулярный микрорельеф, коэффициент трения скольжения, комбинированное дорнование, металлоплакирующая смазка.

**Keywords:** regular microrelief, coefficient of sliding friction, combined burnishing.

На основе структурно-параметрического анализа методов дорнования отверстий показано, что коэффициент трения скольжения является важным параметром, влияющим на системный анализ-синтез оптимально-эффективных характеристик соответствующих технологических операций и процессов [1–7].

Одна из перспективных тенденций целенаправленного совершенствования методов

комбинированного дорнования отверстий — совместное применение регулярной микрогеометрии воздействующих поверхностей инструмента и инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского [8–13].

Для оценки влияния характера и параметров микрогеометрии поверхности инструмента, а также состава технологической смазки на ко-

эffiциент трения скольжения в методах комбинированного дорнования отверстий предварительно проведены экспериментальные исследования. В качестве образцов-заготовок использовали полые цилиндры из латуни марки ЛС59-1 ( $HВ = 1550$  МПа) с наружным диаметром 39 мм и высотой 40 мм. Предварительная обработка отверстий образцов-заготовок — растачивание (параметр шероховатости поверхности  $Ra < 2,5$  мкм).

В качестве инструмента использовали сборную прошивку — дорн с деформирующими элементами из быстрорежущей стали марки Р6М5 [8]. Диаметры деформирующих элементов по калибрующей ленточке составляли 20,11...20,24 мм, углы рабочего и обратного конусов —  $5^\circ$ , ширина калибрующей ленточки — 7 мм.

Регулярный микрорельеф (РМР) воздействующей поверхности деформирующих элементов выполняли на исходном иррегулярном микрорельефе (ИМР), полученном после шлифования и полирования, в виде однозаходных винтовых канавок с радиусом 1,5 мм, шагом  $\Pi_k = 0,5$  мм и глубиной  $\Gamma_k = 8$  и 20 мкм на участке калибрующей ленточки [8, 12].

Продольные профилограммы калибрующих ленточек деформирующих элементов представлены на рис. 1. Параметры РМР  $\Gamma_k = \Pi_k = 0$  условно соответствуют ИМР. Фактическая абсолютная деформация  $i_\phi$  на диаметр отверстия образцов-заготовок варьировали в диапазоне 0,1...0,4 мм. Обработку выполняли на испытательной машине модели Р5 при скорости дорнования 0,05 м/мин. В качестве базовой технологической смазки использовали минеральное масло марки И-40 с добавкой металлоплакирующей медьсодержащей присадки "Валена SV", реализующей "эффект безызносного трения Гаркунова—Крагельского" за счет самоорганизации контактных процессов [13].

Объемная доля присадки  $C$  составляла 0, 10 и 20 %.

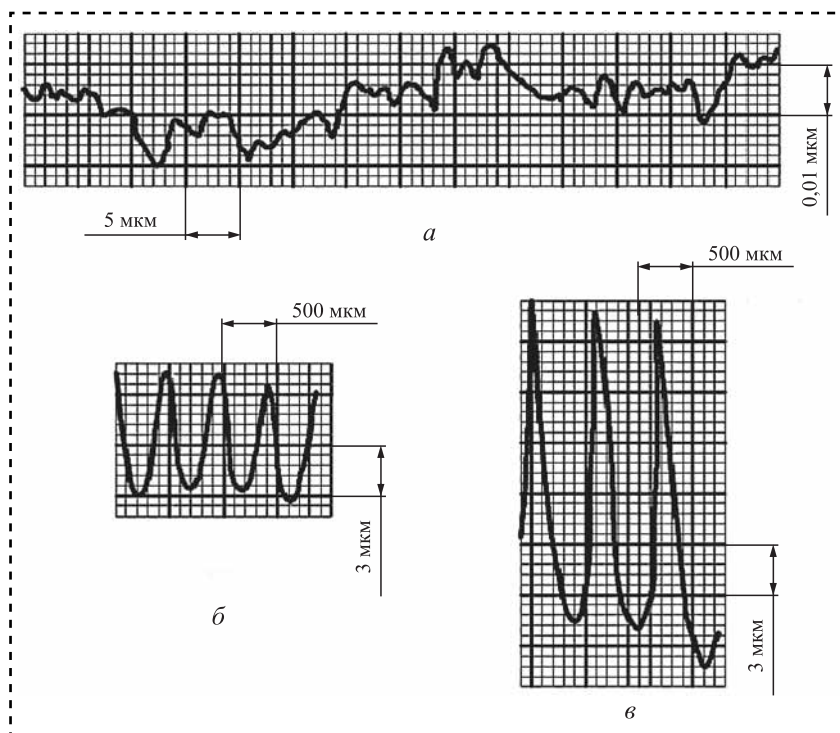
Анализ графических зависимостей удельной силы дорнования от фактической абсолютной деформации, содержания присадки, характера и параметров микрогеометрии воздействующей поверхности инструмента на рис. 2, *a* качественно показывает, что даже при наличии ИМР воздействующей поверхности инструмента происходит существенное уменьшение удельной силы дорнования в условиях применения

металлоплакирующих смазок [9]. Аналитически при  $\Gamma_k = \Pi_k = 0$  данная графическая зависимость может быть представлена в виде, Н/мм:

$$\begin{cases} q_d (C = 0) = 89,86 + 506,67i_\phi; \\ q_d (C = 10\%) = 10,649 + 589,72i_\phi; \\ q_d (C = 20\%) = 13,76 + 565,41i_\phi. \end{cases} \quad (1)$$

Используя зависимости системы (1), можно сделать более точный количественный анализ: в диапазоне концентрации присадки  $C = 10...20$  % в смазке удельная сила дорнования практически одинакова; в диапазоне  $i_\phi = 0,1...0,4$  мм по сравнению со смазкой И-40 (чистое минеральное масло без присадки  $C = 0$ ) сила уменьшается на 50,4...18 %; при этом при равной удельной силе дорнования в диапазоне  $q_d = 150...300$  Н/мм по сравнению с чистым минеральным маслом без присадки смазка с концентрацией присадки 10...20 % позволяет увеличить абсолютную фактическую деформацию отверстия  $i_\phi$  до двух раз [10].

Такой энергосиловой эффект, а также возможное увеличение производительности обработки (увеличение  $i_\phi$  при равной силе) объясняется образованием в очаге деформации визуально не наблюдаемой медной сервовитной пленки, облада-



**Рис. 1. Продольные профилограммы калибрующих ленточек деформирующих элементов:**

*a* —  $\Gamma_k = \Pi_k = 0$ ; *б* —  $\Gamma_k = 8$  мкм,  $\Pi_k = 0,5$  мм; *в* —  $\Gamma_k = 20$  мкм,  $\Pi_k = 0,5$  мм

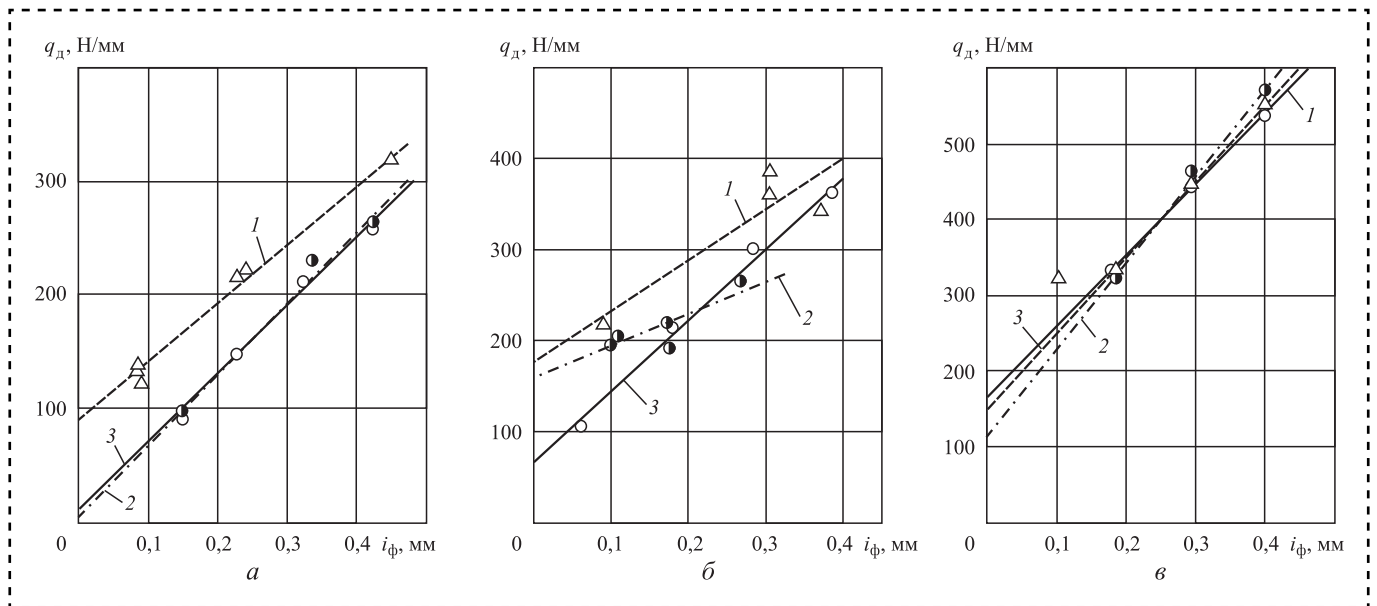


Рис. 2. Зависимость удельной силы дорнования при  $\Gamma_k = \text{Ш}_k = 0$  (а),  $\Gamma_k = 8 \text{ мкм}$ ,  $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$  (б) и  $\Gamma_k = 20 \text{ мкм}$ ,  $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$  (в) от фактической абсолютной деформации и объемной доли присадки  $C, \%$ :  
1 – 0; 2 – 10; 3 – 20

ющей феноменальными физическими свойствами: интенсификацией "эффекта Ребиндера"; снижением коэффициента граничного трения до значений коэффициента жидкостного трения; исключением прямого контакта микровыступов шероховатых поверхностей инструмента и заготовки [10, 11].

На рис. 2, б представлена графическая зависимость удельной силы дорнования при использовании инструмента с РМР, имеющего параметры  $\Gamma_k = 8 \text{ мкм}$ ,  $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$ .

Качественный анализ данной зависимости показывает, что РМР в совокупности с металлоплакирующими смазками еще более существенно влияет на протекание контактных процессов.

В этом случае оптимальна технологическая смазка с  $C = 10 \%$ , так как при  $i_\phi = 0,1 \dots 0,4 \text{ мм}$  удельная сила снижается на 15,9...23,8 % соответственно.

Аналитически при  $\Gamma_k = 8 \text{ мкм}$ ,  $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$  данная зависимость может быть представлена в виде, Н/мм:

$$\begin{cases} q_d (C = 0) = 176,97 + 569,53i_\phi; \\ q_d (C = 10 \%) = 162,56 + 341,54i_\phi; \\ q_d (C = 20 \%) = 66,05 + 802,1i_\phi. \end{cases} \quad (2)$$

Приведенный порядок цифр указывает на новый феномен — рост эффекта по снижению удельной силы дорнования при увеличении абсолютной фактической деформации отверстия.

При удельной силе дорнования  $q_d = 200 \dots 350 \text{ Н/мм}$  производительность обработки  $i_\phi$  в условиях применения металлоплакирующей

смазки ( $C = 10 \%$ ) может быть увеличена почти в два раза.

Такие результаты объясняются большой "маслоемкостью" РМР по сравнению с ИМР, а также большими контактными нормальными давлениями на выступах РМР, что в совокупности интенсифицирует образование сервовитной пленки [12, 13].

На рис. 2, в представлена графическая зависимость удельной силы дорнования при использовании инструмента с РМР, имеющего параметры  $\Gamma_k = 20 \text{ мкм}$ ,  $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$ .

Аналитическая данная графическая зависимость может быть представлена в виде, Н/мм:

$$\begin{cases} q_d (C = 0) = 149,45 + 980,11i_\phi; \\ q_d (C = 10 \%) = 102,93 + 1160,39i_\phi; \\ q_d (C = 20 \%) = 164,65 + 894,64i_\phi. \end{cases} \quad (3)$$

Совместный анализ графической (см. рис. 2, в) и аналитической зависимостей (3) показывает, что в диапазоне  $i_\phi = 0,1 \dots 0,4 \text{ мм}$  энергосиловой эффект практически отсутствует. Это связано с тем, что РМР с глубиной канавок  $\Gamma_k = 20 \text{ мкм}$  помимо деформирования реализует параллельное воздействие в виде микрорезания, на наличие которого указывала микростружка, плотно расположенная в канавках такого РМР (рис. 3) [8, 10–12].

Полностью забитые микростружкой канавки РМР интенсивно не аккумулируют технологическую смазку, которая не подается в очаг деформации и не минимизирует трение.



**Рис. 3. Микростружка, образующаяся в результате дорнования отверстий инструментом с параметрами РМР  $\Gamma_k = 20$  мкм,  $\Pi_k = 0,5$  мм и объемной долей присадки  $C = 20$  %**

Для определения коэффициента трения скольжения в методах дорнования отверстий использовали упрощенную формулу И.В. Крагельского [12, 14]:

$$f = f_a + f_d = \left( \frac{\tau_0}{HB_3} + \beta \right) + \left( 0,4 \sqrt{\frac{(H_{3\max} + h_{c.п}) \varepsilon_3}{R_{\Pi}}} \right), \quad (4)$$

где  $f_a, f_d$  — адгезионная и деформационная составляющие коэффициента трения скольжения;

$\tau_0$  — прочность адгезионной связи при отсутствии нормального контактного давления, МПа;

$\beta$  — пьезокоэффициент влияния нормального контактного давления на прочность адгезионной связи,  $\beta = 0$ ;

$\varepsilon_3$  — относительная деформация максимального микровыступа шероховатой поверхности отверстий образцов-заготовок;

$H_{3\max}$  — высота максимального микровыступа шероховатой поверхности отверстий образцов-заготовок, мкм;

$R_{\Pi}$  — приведенный радиус кривизны при вершине единичного микровыступа шероховатой поверхности деформирующего элемента прошивки-дорна, мкм.

$HB_3$  — исходная твердость материала образцов-заготовок по Бринеллю, МПа;

$h_{c.п}$  — толщина сервоитной пленки металлоплакирующей присадки,  $h_{c.п} = 1,5$  мкм.

В табл. 1–3 приведены исходные данные и расчетные значения  $f, f_a, f_d$  по выражению (4).

Анализ результатов табл. 1 и зависимостей на рис. 4, а говорит о значительном влиянии исходной шероховатости поверхности отверстия образцов-заготовок (параметр  $H_{3\max}$ ) и объемной доли многофункциональной металлоплакирующей присадки на коэффициент трения скольжения. Происходит существенное изменение (уменьшение) крайне негативной адгезионной составляющей, вызывающей наростообразование обрабатываемого материала на инструменте [15, 16].

Противоречие между удельной силой дорнования (см. рис. 2, а) и коэффициентом трения (см. рис. 4, а) можно объяснить с позиций физико-химической механики ("эффект Ребиндера") — существенного влияния свойств металлоплакирующей смазки на параметры очага деформации в виде знака и величины волны внеконтактной деформации, возникающей на рабочем конусе деформирующего элемента [13, 14, 17].

Таблица 1

**Коэффициенты трения скольжения при дорновании отверстий инструментом с параметрами РМР  $\Gamma_k = \Pi_k = 0$**

Параметр	Объемная доля присадок $C, \%$											
	0				10				20			
$i_{\Phi}, \text{мм}$	0,0842	0,0742	0,0817	0,2275	0,2475	0,1434	0,337	0,43	0,14	0,225	0,3224	0,4342
$H_{3\max}, \text{мкм}$	2,172	2,143	3,399	2,399	2,712	10,374	12,468	11,292	12,894	12,132	12,75	13,212
$\varepsilon_3$	0,467	0,444	0,518	0,8299	0,852	0,777	0,696	0,648	0,546	0,644	0,663	0,633
$\tau_0, \text{МПа}$	12,837				1,521				1,965			
$HB_3, \text{МПа}$	1550											
$R_{\Pi}, \text{мкм}$	207											
$f_a$	0,0082				0,001				0,0012			
$f_d$	0,028	0,027	0,0368	0,0392	0,0422	0,0844	0,103	0,08	0,0779	0,1026	0,1049	0,1066
$f$	0,0362	0,0353	0,0451	0,0474	0,0504	0,0854	0,104	0,081	0,0791	0,1038	0,1061	0,1078



Таблица 2

Коэффициенты трения скольжения при дорновании отверстий инструментом с параметрами РМР  $\Gamma_k = 8$  мкм,  $\Pi_k = 0,5$  мм

Параметр	Объемная доля присадок $C$ , %												
	0				10					20			
$i_{\phi}$ , мм	0,0884	0,304	0,303	0,379	0,1017	0,095	0,1775	0,165	0,271	0,067	0,17	0,277	0,387
$H_{3\max}$ , мкм	2,494	3,174	2,886	3,792	2,232	3,598	2,741	2,329	5,394	2,712	2,43	2,772	2,826
$\varepsilon_3$	0,814	0,833	0,808	0,880	0,763	0,861	0,876	0,842	0,899	0,847	0,822	0,902	0,916
$\tau_0$ , МПа	25,28				23,22					9,435			
НВ <sub>3</sub> , МПа	1550												
$R_{\Pi}$ , мкм	938												
$f_a$	0,0163				0,0149					0,006			
$f_d$	0,0186	0,0219	0,0199	0,0238	0,022	0,0294	0,0251	0,0234	0,0325	0,0246	0,0234	0,0256	0,0259
$f$	0,0349	0,0375	0,0362	0,0401	0,0369	0,0443	0,040	0,0383	0,0474	0,0306	0,0294	0,0316	0,0319

Таблица 3

Коэффициенты трения скольжения при дорновании отверстий инструментом с параметрами РМР  $\Gamma_k = 20$  мкм,  $\Pi_k = 0,5$  мм

Параметр	Объемная доля присадок $C$ , %												
	0				10					20			
$i_{\phi}$ , мм	0,1017	0,1975	0,296	0,4034	0,0984	0,1908	0,29	0,4042	0,1117	0,1934	0,29	0,4084	
$H_{3\max}$ , мкм	12,09	12,288	13,314	13,134	12,75	12,312	13,242	11,01	12,036	12,012	13,176	12,498	
$\varepsilon_3$	0,89	0,914	0,893	0,883	0,903	0,861	0,878	0,893	0,904	0,888	0,866	0,844	
$\tau_0$ , МПа	21,35				14,7					23,52			
НВ <sub>3</sub> , МПа	1550												
$R_{\Pi}$ , мкм	12												
$f_a$	0,0137				0,0094					0,015			
$f_d$	0,378	0,386	0,395	0,393	0,414	0,398	0,415	0,408	0,403	0,401	0,442	0,432	
$f$	0,392	0,40	0,409	0,406	0,423	0,407	0,424	0,417	0,418	0,416	0,457	0,447	

При этом большое значение коэффициента трения компенсируется в значительной мере высотой и знаком волны внеконтактной деформации, в большей мере уменьшая удельную силу дорнования [14, 17].

Оптимальное соотношение адгезионной и деформационной составляющей коэффициента трения скольжения имеет место при дорновании отверстий инструментом с параметрами РМР:  $\Gamma_k = 8$  мкм,  $\Pi_k = 0,5$  мм (рис. 2, б и 4, б, табл. 2). При этом по сравнению с ИМР (см. табл. 1, рис. 2, а) РМР существенно влияет на протекание контактных процессов за счет формирования упорядоченных геометрических и физических полей, а также развитых дислокационных структур, ускоряющих химические реакции с поверхностно-активными компонентами металлоплакирующей смазки [18].

Воздействие на обрабатываемый материал в виде одновременного деформирования и микрорезания (рис. 2, в, 3 и 4, в, табл. 3) соответствует переходу порога внешнего трения, для которого характерно  $f > 0,22$  [8, 12].

Полученные результаты существенно расширяют информационную базу алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" и инновационного фундаментального направления "трибология на основе самоорганизации" для системного структурно-параметрического синтеза конкурентоспособных методов дорнования отверстий [1—5, 7, 12, 13, 15, 16, 18—20].

### Библиографический список

- Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачёва Н.Ю. Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20—26.
- Цеханов Ю.А., Розенберг О.А. Определение коэффициента пластического трения с помощью линий скольжения при деформирующем протягивании // Кузнечно-штамповочное производство. 1977. № 2. С. 18—19.
- Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
- Сивцев Н.С. Развитие теории и технологии дорнования отверстий в нестационарных условиях трения инструмента с заготовкой: дис. ... д-ра техн. наук. Ижевск, 2005. 298 с.

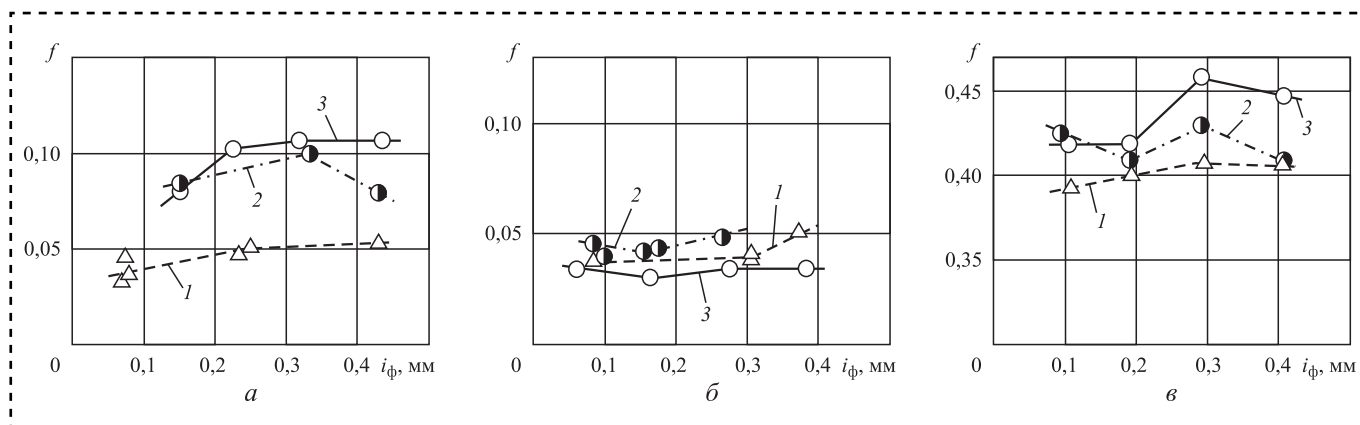


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения скольжения при параметрах РМР  $\Gamma_k = \text{Ш}_k = 0$  (а),  $\Gamma_k = 8$  мкм,  $\text{Ш}_k = 0,5$  мм (б) и  $\Gamma_k = 20$  мкм,  $\text{Ш}_k = 0,5$  мм (в) от фактической абсолютной деформации и объемной доли присадки  $C$ , %: 1 — 0; 2 — 10; 3 — 20

5. Сковорцов В.Ф., Арляпов А.Ю. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 91 с.

6. Shchedrin A.V. Generalized space-time model of deforming-cutting process // Russian Engineering Research. 1997. Vol. 17. No. 3. P. 55–59.

7. Воронцов А.Л. Промышленное апробирование результатов исследования совмещенного процесса редуцирования-дорнования // Кузнечно-штамповочное производство, обработка металлов давлением. 2017. № 9. С. 3–10.

8. Повышение эффективности комбинированной обработки отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхностей рабочих элементов инструмента / А.В. Шедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 6. С. 14–19.

9. Шедрин А.В., Таненгольц А.Б. Совершенствование характеристик инструмента для деформирующе-выглаживающего прошивания отверстий // Машиностроитель. 2002. № 11. С. 20–23.

10. Шедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А. Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 76–79.

11. Влияние состава металлоплакирующей смазки на характеристики комбинированного прошивания отверстий в заготовках из латуни марки ЛС59-1 / А.В. Шедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2017. № 1. С. 27–34.

12. Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов / А.В. Шедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15–20.

13. Трибология на основе самоорганизации / Д.Н. Гаркунов и др. // Германия: LAMBERT. 245 с.

14. Формулы для прогнозирования силы комбинированного дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях применения металлоплакирующих смазок / А.В. Шедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. Том 18. № 11. С. 518–522.

15. Влияние угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики методов комбинированного прошивания (протягивания) отверстий // А.В. Шедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 3. С. 20–24.

16. Технологические возможности метода комбинированного дорнования отверстий инструментом с винтовой геометрией воздействующих поверхностей / А.В. Шедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Том 15. № 8. С. 342–347.

17. Формирование очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании / А.В. Шедрин и др. // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 3–7.

18. Новое научное открытие в трибологии на основе самоорганизации // А.В. Шедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2019. № 6. С. 18–25.

19. Технологические возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок / А.В. Шедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 30–35.

20. Повышение эффективности комбинированного дорнования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности отверстия обрабатываемой заготовки / А.В. Шедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 7. С. 314–317.

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 20.05.2020. Подписано в печать 02.07.2020. 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.