

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

2021 Том 22  
7 (252)

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Технологичность конструкции

- Безъязычный В.Ф., Истратов В.А., Елисеичев Е.А.** Анализ устройства микроприводов, используемых в биопротезировании верхних конечностей, в целях возможности автоматизации технологического процесса сборки . . . . . 291
- Лукашева С.Ю., Тикунова К.В., Микаева А.С., Микаева С.А.** Сборка электронного многофункционального сумматора . . . . . 297

#### Трение и смазка в машинах и механизмах

- Бойко М.В., Колесников И.В., Ермаков С.Ф., Бойко Т.Г., Бичеров А.А.** Повышение антифрикционной способности несущих поверхностей трибосистем при использовании смазочных материалов, легированных соединениями холестерина и комплексонами . . . . . 303
- Поляков С.А., Кулешова Е.М.** Анализ динамики возникновения трибо-технических отказов в червячных передачах и методы их предотвращения . . . . . 306
- Шишкарёв М.П.** Модернизация адаптивной фрикционной муфты с переменным коэффициентом усиления (второй вариант) . . . . . 313

#### В помощь конструктору, технологу

- Головкин П.А.** Влияние термической обработки на стабилизацию размеров точных деталей из прецизионного сплава 29НК-ВИ . . . . . 320
- Колокатов А.М.** Рекомендации по выбору характеристик алмазных брусков при плосковершинном хонинговании гильз цилиндров ДВС . . . . . 324
- Лапшин В.П., Попов Н.А., Омелечко В.Ю.** Вопросы вибродиагностики процессов резания на металлообрабатывающих станках . . . . . 330

**Председатель редакционного совета**  
В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

#### Редакционный совет

##### МОСКВА

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

#### Региональные редсоветы

##### ВЛАДИВОСТОК

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

##### ВОЛГОГРАД

- В.И. ЛЫСАК, акад. РАН

##### ИЖЕВСК

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

##### КАЗАНЬ

- Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

##### КОВРОВ

- Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

##### КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

##### НИЖНИЙ НОВГОРОД

- С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

##### ОРЕЛ

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

##### ОРЕНБУРГ

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

##### ПЕРМЬ

- С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.  
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

##### РОСТОВ-НА-ДОНУ

- А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.  
И.В. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.  
А.П. СЫЧЕВ

##### РЫБИНСК

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

##### САМАРА

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

##### САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

- Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

##### ТОМСК

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

##### ТУЛА

- А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.  
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

##### ХАБАРОВСК

- В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

##### Беларусь

##### МИНСК

- В.Л. БАСИНОК, д.т.н.  
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

##### ГОМЕЛЬ

- В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

##### Украина

##### КИЕВ

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

##### ДОНЕЦК

- А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

##### Польша

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

#### Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

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

2021 Vol. 22  
7 (252)

### CONTENTS

#### *Manufacturability of a construction*

- Bez'yazychny V.F., Istratov V.A., Eliseichev E.A.** Analysis of the device of microdrives used in bioprosthesis of the upper extremities, in order to automate the assembly process . . . . . 291
- Lukasheva S.Yu., Tikunova K.V., Mikaeva A.S., Mikaeva S.A.** Assembly of the electronic multifunctional adder . . . . . 297

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

- Boiko M.V., Kolesnikov I.V., Ermakov S.F., Boiko T.G., Bicherov A.A.** Increasing the antifriction capacity of the bearing surfaces of tribosystems when using lubricants doped with cholesterol compounds and complexones . . . . . 303
- Polyakov S.A., Kuleshova E.M.** Analysis of the dynamics of tribotechnical failures in worm gears and methods for their prevention . . . . . 306
- Shishkarev M.P.** Modernization of the adaptive friction clutch with variable gain (second option) . . . . . 313

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

- Golovkin P.A.** The effect of heat treatment on the size stabilization of precision parts made of 29NK-VI precision alloy . . . . . 320
- Kolokatov A.M.** Recommendations for selecting the characteristics of diamond bars, when plateau-honing cylinder liners of internal combustion engines . . . . . 324
- Lapshin V.P., Popov N.A., Omelechko V.Yu.** Vibration diagnostics issues in cutting processes on metalworking machines . . . . . 330

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

#### Editors

##### MOSCOW

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

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

#### Regional editors

##### VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN  
A.A. SUPONIA

##### VOLGOGRAD

V.I. LYSAK

##### IZHEVSK

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

##### KAZAN

R.I. ADGAMOV

##### KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

##### KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN  
A.M. SHPILEV

##### NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

##### OREL

Yu.S. STEPANOV  
G.A. KHARLAMOV

##### ORENBURG

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

##### PERM

S.M. BELOBORODOV  
V.F. MAKAROV

##### ROSTOV-ON-DON

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

##### RYBINSK

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

##### SAMARA

Yu.A. VASHUKOV  
M.A. EVDOKIMOV

##### ST.-PETERSBURG

E.V. SHALOBAEV

##### TOMSK

A.V. KOLUBAEV  
V.E. PANIN

##### TULA

A.A. MALIKOV  
V.V. PREYS

##### KHABAROVSK

V.I. SCHPORT

##### Belarus

##### MINSK

V.L. BASINJUK  
M.L. KHEIFETZ

##### GOMEL

V.E. STARZHINSKI

##### Ukraine

##### KIEV

A.S. ZENKIN  
V.A. MATVIENKO

##### DONETSK

A.N. MIKHAILOV

##### Poland

P. LEBKOVSKI  
E. LUNARSKII

#### Executive editors of current issue:

E.M. NUZHINA, I.M. GLIKMAN

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

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

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

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

Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

**В.Ф. Безъязычный**, д-р техн. наук, **В.А. Истратов**, **Е.А. Елисеичев**  
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)  
E-mail: technology@rsatu.ru

## Анализ устройства микроприводов, используемых в биопротезировании верхних конечностей, в целях возможности автоматизации технологического процесса сборки

*Рассмотрены устройства микроприводов производства MAXON MOTOR и FAULHABER, которые применяются в бионических протезах кисти человеческой руки. Проведен анализ их структуры по критериям: тип микропривода, геометрическая форма и габаритно-присоединительные размеры. Для оптимизации технологического процесса сборки микроприводов предложено использовать роботизированный многофункциональный захват.*

*The devices of microdrives manufactured by MAXON MOTOR and FAULHABER, which are used in bionic prosthetics of the human hand are considered. The analysis of their structure by criteria is carried out: microdrive type, geometric shape, and overall connection dimensions. To optimize the technological process of assembling microdrives, it is proposed to use a robotic multi-functional gripper.*

**Ключевые слова:** бионический протез кисти человеческой руки, микропривод, анализ конструктивных особенностей, возможность автоматизации сборки микропривода.

**Keywords:** bionic prosthesis of the human hand, microdrive, analysis of design features, the possibility of automating the assembly of the microdrive.

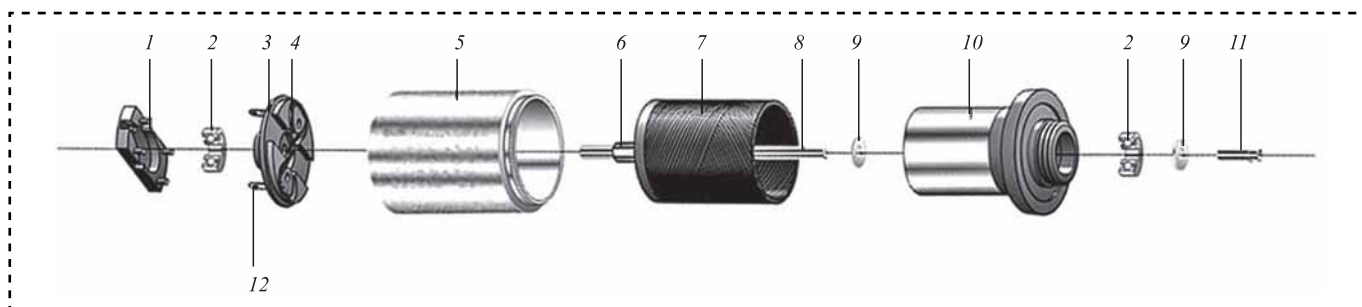
### Введение

В последние годы различные робототехнические устройства все шире внедряются в сферу медицины. Прежде всего это связано с развитием соответствующей элементной базы мехатронных и сенсорных устройств, с разработкой биологически безопасных материалов, а также методов получения и обработки информации о состоянии отдельных органов человека. Одно из перспективных направлений медицинской робототехники — разработка аппаратно-программных средств протезирования конечностей и их отдельных частей. Это позволяет в значительной степени улучшить качество жизни человека, его физические (передвижение, взятие, перенос предметов и т.д.) и социологические потребности, снизить социальную нагрузку на его родственников, патронажные службы и пр.

Одна из ключевых систем современного бионического протеза кисти человеческой руки (биопротез) — система электромеханики. Ее образуют исполнительный механизм — микропривод и система по его управлению. При разработке биопротеза к выбору необходимого микропривода предъявляют наиболее важные требования — необходимые усилие и момент, массогабаритные показатели и надежность (наработка на отказ). На сегодняшний момент известны два крупнейших производителя микроприводов, оборудование которых широко применяется в качестве исполнительного механизма системы электромеханики биопротеза — MAXON MOTOR и FAULHABER.

### Устройство микроприводов

Проведем сравнительный анализ структуры микроприводов по критериям: тип, геометри-



**Рис. 1. Устройство микродвигателя постоянного тока FAULHABER:**

1 — крышка торцевая; 2 — шарикоподшипник; 3 — крышка щеток; 4 — щетки; 5 — корпус; 6 — коллектор; 7 — обмотка; 8 — вал; 9 — шайба; 10 — магнит; 11 — втулка удерживающая; 12 — выводы электрические

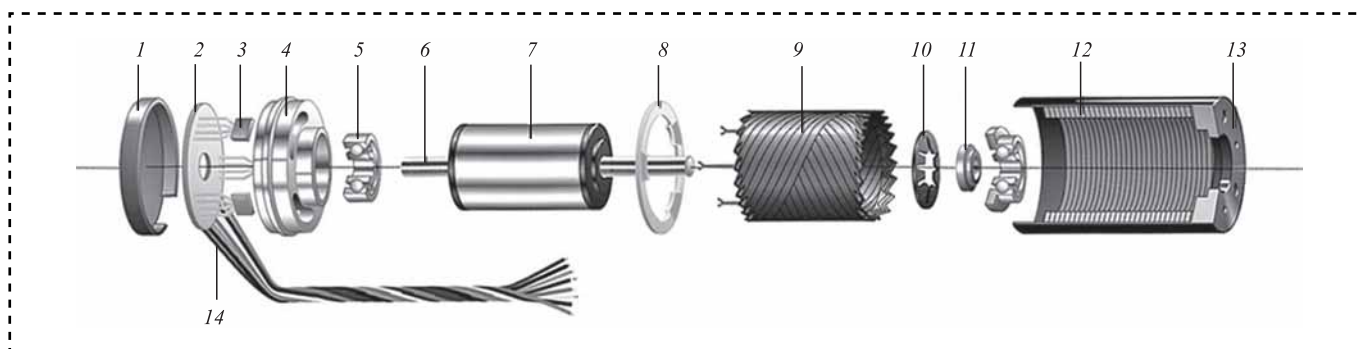
ческая форма и габаритно-присоединительные размеры в целях определения направления оптимизации их технологического процесса сборки.

Диаметр электродвигателей FAULHABER со щетками из драгоценных металлов варьируется от 6 до 22 мм, минимальная длина корпуса составляет 13 мм, максимальная — 33 мм (рис. 1). Двигатели постоянного тока с графитовыми щетками имеют диаметр от 13 до 38 мм, длину корпуса от 27 до 90 мм. Приводная система дополнена посредством множества высокотехнологичных стандартных компонентов, в том числе энкодеров с высоким разрешением, прецизионных редукторов и приводной электроники. В соответствии с конкретными требованиями заказчика приводные системы могут быть модифицированы.

Бесщеточный микродвигатель постоянного тока FAULHABER выполнен на основе технологии асимметричной обмотки катушки (рис. 2). Он состоит из трехфазной катушки, корпуса статора и двухполюсного магнита NdFeB на выходном валу в качестве ротора. Серводвигатели постоянного тока идеально подходят для использования в лабораторном и медицинском оборудовании.

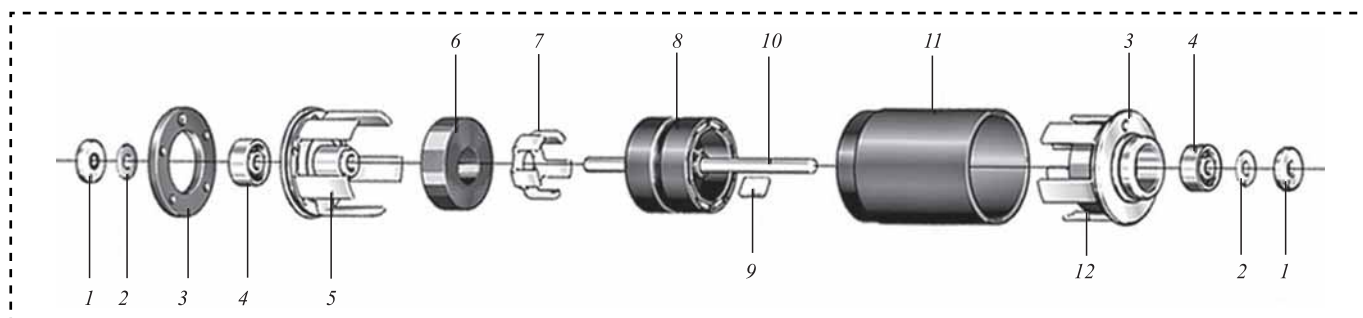
Габаритно-присоединительные размеры бесщеточных микродвигателей FAULHABER варьируются в зависимости от серии. Так, диаметр бесщеточных серводвигателей постоянного тока, изготовленных по 2-полюсной технологии, составляет 3...44 мм при длине корпуса от 8 до 90 мм, а двигатели, выполненные по 4-полюсной технологии, в диаметре достигают 22...32 мм при длине корпуса 32...74 мм. Варианты модифицированных двигателей дополнены стандартными комплектующими. Например, серии двигателей FAULHABER 1525...BRC, 3153...BRC и 1935...BRC — это бесщеточные двигатели постоянного тока со встроенным регулятором скорости. Их диаметр составляет от 15 до 32 мм, а длина корпуса варьируется от 25 до 85,4 мм.

Шаговые двигатели FAULHABER — это двухфазные многополюсные двигатели с постоянными магнитами (рис. 3). Использование редкоземельных магнитов обеспечивает исключительно высокое соотношение мощности к объему. Ротор состоит из пластиковой опоры, изготовленной методом литья под давлением, и магнитов, которые собраны в 10- или



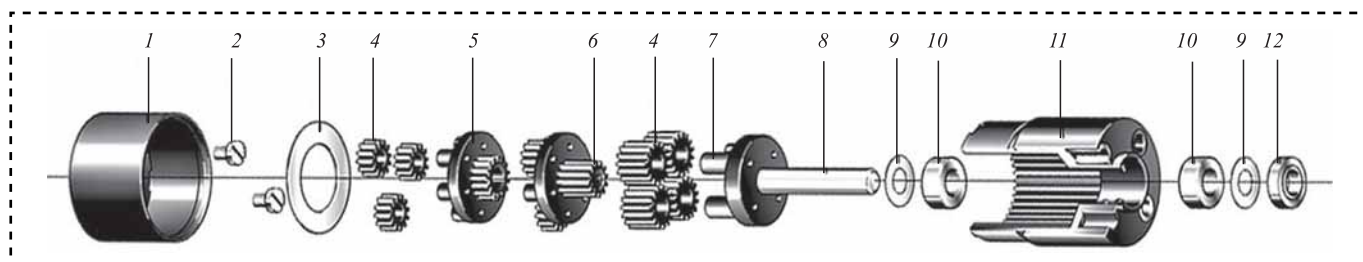
**Рис. 2. Бесщеточный серводвигатель постоянного тока FAULHABER:**

1 — задняя крышка; 2 — плата печатная; 3 — датчики Холла; 4 — опора подшипника; 5 — шарикоподшипник; 6 — вал; 7 — магнит; 8 — плата печатная; 9 — обмотка; 10 — шайба пружинная; 11 — втулка распорная; 12 — статор; 13 — корпус; 14 — выводы



**Рис. 3. Шаговый двигатель FAULHABER:**

1 — стопорное кольцо; 2 — шайба; 3 — плата печатная; 4 — шарикоподшипник; 5 — задняя крышка/статор; 6 — обмотка, фаза А; 7 — внутренний статор; 8 — ротор; 9 — магниты; 10 — вал; 11 — корпус; 12 — обмотка, фаза В; 13 — передняя крышка/статор



**Рис. 4. Планетарный редуктор FAULHABER:**

1 — фланец двигателя; 2 — винты; 3 — шайба; 4 — сателлиты; 5 — водило планетарной передачи; 6 — солнечная шестерня; 7 — вал сателлита; 8 — выходной вал; 9 — шайба; 10 — спеченный подшипник; 11 — корпус/кольцевое зубчатое колесо; 12 — стопорное кольцо

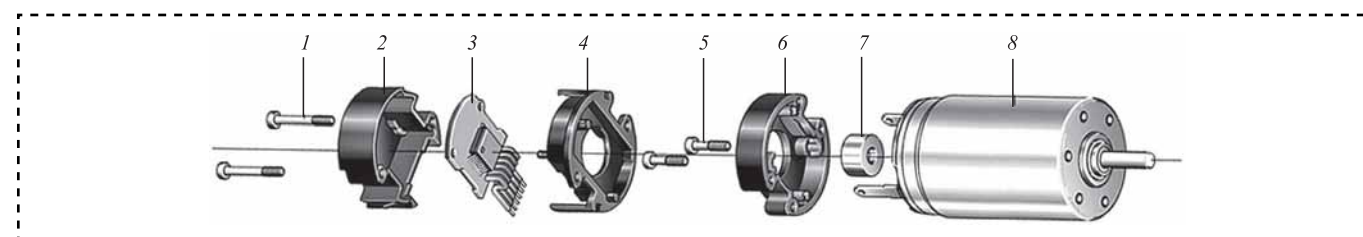
12-полюсную конфигурацию в зависимости от типа двигателя. Большой объем магнита помогает достичь высокой плотности крутящего момента. Статор состоит из двух катушек дискретной фазы, которые расположены по обе стороны от ротора.

Двухфазные шаговые двигатели с постоянным магнитом FAULHABER представлены в 11 сериях. Диаметр варьируется от 6 до 52 мм, длина корпуса — от 9,5 до 32,6 мм.

Прочная конструкция делает планетарные редукторы FAULHABER в сочетании с микродвигателями постоянного тока идеальными для достижения высокого крутящего момента и прекрасных рабочих характеристик (рис. 4). В большинстве случаев зубчатая передача выходного каскада сделана из пластика для под-

держания как можно более низких уровней шума при больших оборотах. Для тех случаев, где требуется средний или высокий крутящий момент, планетарные редукторы изготавливают из высококачественного пластика. Они являются идеальным решением для прикладных задач, в которых решающую роль играют малый вес и высокая плотность крутящего момента. Диаметр стандартных планетарных редукторов FAULHABER составляет 22...42 мм, минимальная длина корпуса 8 мм, максимальная достигает 90 мм.

Энкодеры FAULHABER выполнены со встроенным магнитом с диаметральной намагничиванием, который вплотную прилегает к валу двигателя и создает осевое магнитное поле (рис. 5). Энкодеры доступны в виде при-



**Рис. 5. Энкодер FAULHABER:**

1, 5 — винты; 2 — задняя крышка; 3 — печатная плата; 4 — переходный фланец; 6 — торцевая крышка; 7 — сенсорный магнит; 8 — двигатель

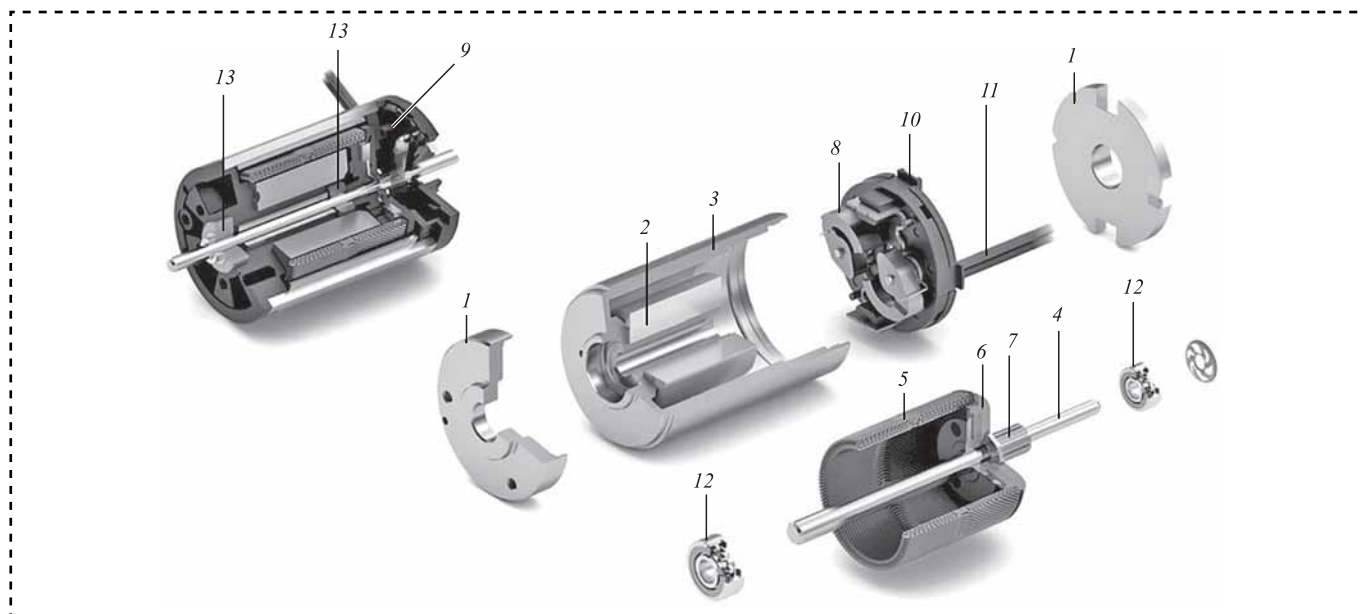


соединяемых к двигателям FAULHABER комплектов, а также в виде встраиваемых компонентов для серводвигателей постоянного тока. Диаметр энкодера варьируется от 6 до 42 мм в зависимости от серии.

Диаметр двигателей постоянного тока MAXON MOTOR варьируется от 6 до 65 мм, длина корпуса — от 15,6 до 131,2 мм (рис. 6).

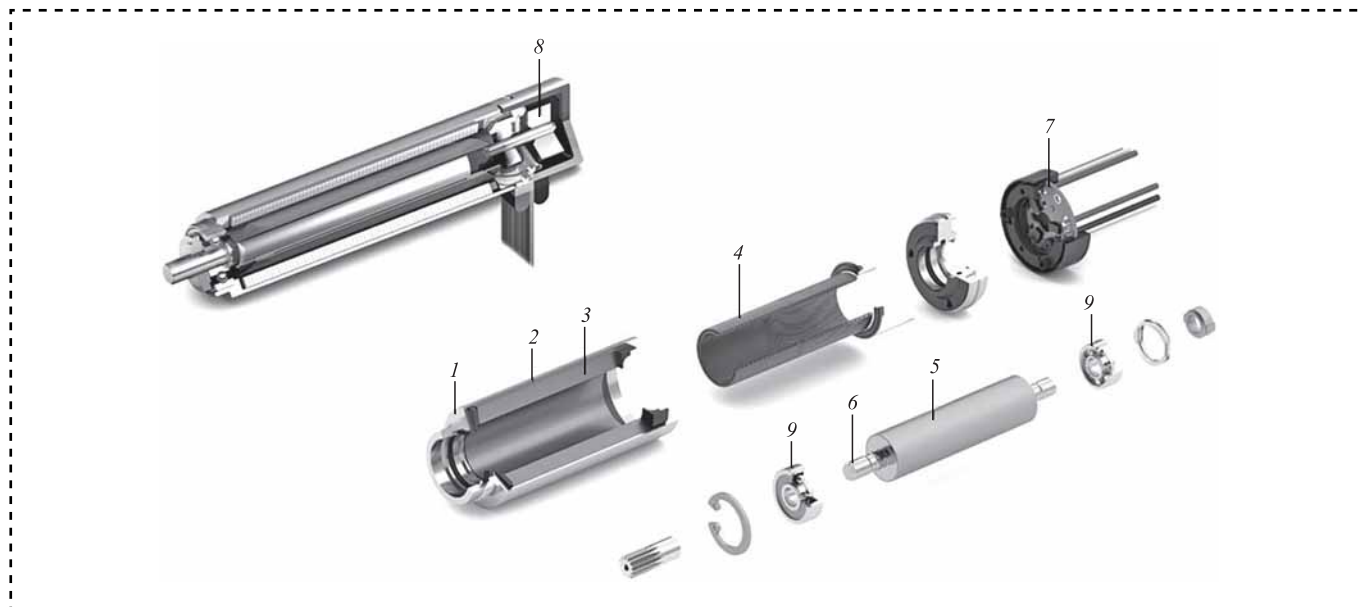
Минимальный диаметр бесщеточных двигателей MAXON MOTOR составляет 4 мм, максимальный диаметр — 90 мм (рис. 7). Длина двигателей в зависимости от серии составляет 18,8...177,3 мм.

Диаметр редукторов MAXON MOTOR составляет 4...81 мм в зависимости от серии, а длина — от 5,3 до 135,3 мм (рис. 8).



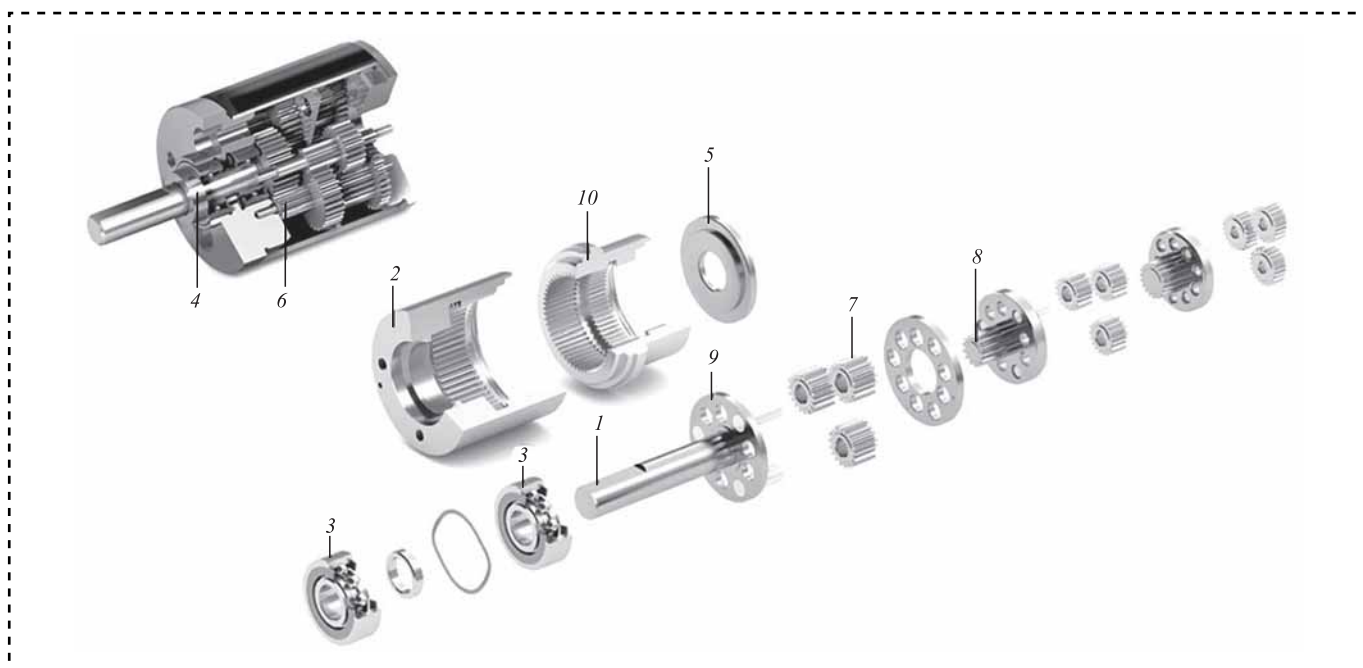
**Рис. 6. Двигатель постоянного тока MAXON MOTOR:**

1 — фланец; 2 — постоянный магнит; 3 — корпус (магнитное замыкание); 4 — вал; 5 — обмотка; 6 — магнитный контур; 7 — коллектор; 8 — графитовые щетки; 9 — щетки из благородных металлов; 10 — крышка щеточно-коллекторного узла; 11 — электрические выводы; 12 — шарикоподшипник; 13 — спеченный подшипник скольжения



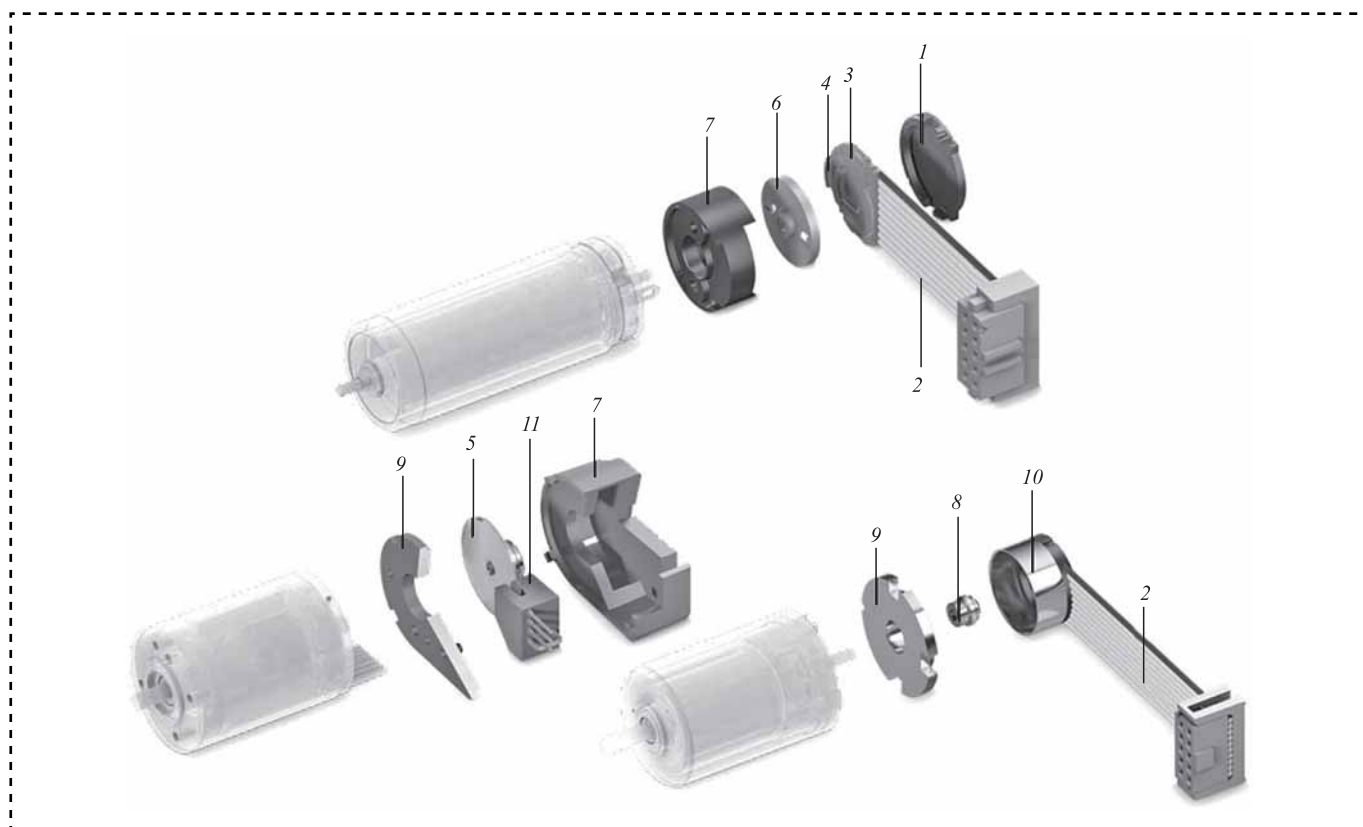
**Рис. 7. Бесщеточный двигатель постоянного тока MAXON MOTOR:**

1 — фланец; 2 — корпус; 3 — пакет из ламинированного стального листа; 4 — обмотка; 5 — постоянный магнит; 6 — вал; 7 — плата с датчиками Холла; 8 — управляющий магнит; 9 — шарикоподшипник



**Рис. 8. Редуктор MAXON MOTOR:**

1 — выходной вал; 2 — присоединительный фланец; 3 — подшипник выходного вала; 4 — защитное уплотнение; 5 — промежуточная плата; 6 — зубчатое колесо; 7 — спутник; 8 — солнечная шестерня; 9 — водило планетарной передачи; 10 — шестерня с внутренним зацеплением



**Рис. 9. Энкодер MAXON MOTOR:**

1 — торцевая крышка; 2 — соединительные контакты двигателя и энкодера; 3 — печатная плата; 4 — магниторезистивный (MR) датчик; 5 — делительный диск; 6 — дисковый многополюсный магнит; 7 — корпус; 8 — маска; 9 — фланец; 10 — датчик с корпусом; 11 — вилка

Диаметр энкодера MAXON MOTOR в зависимости от серии составляет от 6 до 65 мм (рис. 9).

### Заключение

Проанализированы конструктивные устройства микроприводов производства MAXON MOTOR и FAULHABER, которые применяют в системах электромеханики биопротезов, по следующим критериям: тип, геометрическая форма и габаритно-присоединительные размеры. По результатам проведенного анализа установлено, что:

— производители высокотехнологичной приводной техники MAXON MOTOR и FAULHABER предлагают широкий ассортимент микроприводов. Детали, такие как вал, корпус цилиндрический, шарикоподшипник, магнит, обмотка, шайба и др., образующие законченный микропривод обоих производителей, можно классифицировать как подобные по геометрической форме:

— габаритно-присоединительные размеры деталей конструкции приводных систем находятся в диапазоне от 4 до 100 мм в диаметре и от 5 до 200 мм по длине корпуса;

— технологические схемы сборки этих микроприводов также можно определить, как подобные.

Таким образом, для оптимизации технологического процесса сборки микроприводов возможно использование роботизированного многофункционального захвата.

### Библиографический список

1. **Faulhaber** Drive Systems [Электронный ресурс]. URL: <https://www.faulhaber.com/en/about-faulhaber/ Faulhaber-group/> (дата посещения: 05.04.2021).
2. **Precision** Drive Systems 2020/2021 MAXON [Электронный ресурс]. URL: <https://maxongroup.com>
3. **Belter J.T., Segil J.L., Dollar A.M., Weir R.F.** Mechanical desing and performance specifications of anthroporphic prosthetic hand: A review // J. Rehabil. Res. Dev. 2013. Vol. 50. Iss. 5. P. 599—618.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"  
продолжает подписку на журнал

### "СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

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

Тел.: 8 (495) 785-60-69

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





**С.Ю. Лукашева, К.В. Тикунова, А.С. Микаева, канд. экон. наук, С.А. Микаева, д-р техн. наук**  
 (Физико-технологический институт РТУ МИРЭА)  
 E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

## Сборка электронного многофункционального сумматора

*Представлены технические характеристики, устройство и принцип работы электронного многофункционального сумматора для учета электроэнергии СЭМ-3. Сумматор предназначен для контроля и учета потребления генерации электроэнергии и мощности непосредственно у потребителей, а также в автоматизированных системах централизованного учета и контроля, и рассчитан на круглосуточную работу.*

*The technical characteristics, device and principle of operation of the electronic multifunctional adder for electricity metering SEM-3 are presented. The adder is designed to monitor and account for the consumption of electricity generation and power directly from consumers, as well as in automated centralized accounting and control systems, and is designed for round-the-clock operation.*

**Ключевые слова:** сумматор электронный, электроэнергия, мощность, счетчик, сборка, устройство, принцип работы.

**Keywords:** electronic adder, electric power, power, meter, assembly, device, operating principle.

Собранный сумматор электронный многофункциональный СЭМ-3 предназначен для контроля и учета потребления электроэнергии и мощности непосредственно у потребителей, а также в автоматизированных системах централизованного учета и контроля, и рассчитан на круглосуточную работу. В перечень выполняемых функций сумматора входят: прием информации о потреблении или генерации со счетчиков электроэнергии или сумматоров нижнего уровня по цифровому интерфейсу, накопление и хранение информации, вычисление параметров энергии и мощности, передача информации пользователям системы учета по их запросам, передача журнала событий в персональный компьютер (ПК), постоянный отсчет времени.

Данный прибор изготовлен в климатическом исполнении группы 4 по ГОСТ 22261—94 и предназначен для работы при температуре от  $-20$  до  $+55$  °С, относительной влажности воздуха до 90 % при 30 °С и атмосферном давлении от 84 до 106,7 кПа (630...800 мм рт. ст.). Питание сумматора от однофазной сети переменного тока напряжением 85...250 В частоты 50 Гц. Максимальное число подключаемых счетчиков или других цифровых устройств для учета элек-

троэнергии — 256 [1—4]. Максимальное число измеренных каналов (ИК), по которым выполняется сбор информации, ее обработка и хранение в сумматоре — 512. Глубина хранения графиков получасовой мощности по каждому из ИК составляет 12 месяцев, или 365 суток. Сумматор обеспечивает алгебраическое сложение информации, полученной от различных ИК, образуя группы учета от 1 до 64. Набор ИК в группе произвольный, при этом возможно повторение одного и того же ИК в разных группах с разными знаками ("плюс" или "минус") [5, 6].

По цифровому интерфейсу сумматор поддерживает протоколы многофункциональных цифровых устройств, приведенных в табл. 1.

Сумматор обеспечивает:

сбор и передачу информации по шести независимым последовательным интерфейсам;

двунаправленный обмен информацией по сотовой модемной связи с удаленными устройствами и передачу накопленных данных на верхний уровень автоматизированной системы учета электроэнергии, если оборудован встроенным GSM-модулем;

двунаправленный обмен информацией по локальной сети с ПК по встроенному интерфейсу Ethernet 10/100 Base-T;



Протоколы многофункциональных цифровых устройств, поддерживаемых сумматором

Тип устройства	Тип интерфейса	Производитель
Счетчик электроэнергии трехфазный "Меркурий 230ART2-xx PQxSIDN"; "Меркурий 230ART-xx P(Q)xSIDN"; "Меркурий 230ART-xx PxIDN"	CAN или RS485	ООО "НПК "Инкотекс", г. Москва
Счетчик электроэнергии трехфазный "Меркурий 233ART2-xx R(R)"; "Меркурий 233ART-xx R(R)"	RS485	ООО "НПК "Инкотекс", г. Москва
Счетчик электроэнергии трехфазный "Гран Электро СС-301-Х1"	RS485	НП ООО "Гран-Система С", г. Минск
Счетчик электроэнергии однофазный "Гран Электро СС-101-Х4Х"	RS485	НП ООО "Гран-Система С", г. Минск
Счетчик электроэнергии однофазный CE 102 BY	RS485 PLC	ООО "Фанипольский завод измерительных приборов "Энергомера", Беларусь
Счетчик электроэнергии трехфазный CE 301	RS485 PLC	ОАО "Концерн "Энергомера", г. Ставрополь
Счетчик электроэнергии трехфазный CE 303	RS485 PLC	ОАО "Концерн "Энергомера", г. Ставрополь
Счетчик электроэнергии трехфазный Альфа А1140	RS232 RS485	ООО "Эльстер Метроника", г. Москва
Счетчик электроэнергии трехфазный СЭТ4-ТМ.02М (03М)	RS485	Нижегородский завод им. М.В. Фрунзе, г. Нижний Новгород
Счетчик электроэнергии трехфазный ПСЧ-4ТМ.05М	RS485	Нижегородский завод им. М.В. Фрунзе, г. Нижний Новгород
Сумматор электронный СЭМ-2.01	RS232 RS485	УПП «Микрон», г. Витебск (Беларусь)
Сумматор электронный СЭМ-2+	RS232 RS485	ЗАО «Микрон-Энерго», г. Москва

вычисление параметров мощности и энергии по каждому ИК и группе учета и вывод на индикацию любого параметра его функционирования в цифровом или графическом виде;

сохранение данных при отсутствии питающего напряжения, отсчет текущего времени (часы, минуты, секунды) и даты как при включенном, так и при выключенном внешнем питании.

Максимальная мощность, потребляемая сумматором от сети, не более 15 Вт. Его габаритные размеры с гермовводами не более (240×220×115) мм, масса не более 1,7 кг. Конструкция сумматора обеспечивает защиту от несанкционированного изменения параметров программирования и доступа в прибор путем пломбирования крышки доступа к переключателю "Режим работы" и клеммам сумматора.

Пределы допускаемой относительной погрешности преобразования входных цифровых

сигналов в именованные единицы при определении энергии и мощности за сутки и месяц по каналам и группам сумматора не более  $\pm 0,1$  %. Абсолютная погрешность текущего времени, вырабатываемого в течение суток, не более  $\pm 1$  с.

Сумматор представляет собой функционально законченное устройство, используемое в автоматизированных системах сбора и обработки информации (рис. 1 на стр. 2 обложки). Наличие встроенной индикации и клавиатуры позволяет использовать его как автономный прибор. Конструктивно он состоит из пластмассового корпуса с прозрачной крышкой, внутри которого расположены печатные платы контроллера. Под прозрачной крышкой находится передняя панель с индикатором и клавиатурой. В нижней части корпуса под непрозрачной крышкой расположен отсек коммутации с интерфейсными разъемами и отверстия для установки гермовводов.

Обозначения клемм интерфейсов СЭМ-3

Контакт	Разъем XP1		Разъем XP2		Разъем XP3		Разъем XP4	
1	Интерфейс 1	Выход RS232C (TXD)	Интерфейс 2	Выход RS232C (TXD)	Интерфейс 3	RS 485A (плюс)	Интерфейс 5	RS 485A (плюс)
2		Вход RS232C (RXD)		Вход RS232C (RXD)		RS 485B (минус)		RS 485B (минус)
3		Общий		Общий (ноль)		+U (7,2 В)		+U (7,2 В)
4		DTR		DTR	-U	-U		
5		CD		CD	RS 485A (плюс)	RS 485A (плюс)		
6	Технологические	—	Интерфейс 4	—	Интерфейс 6	RS 485B (минус)	RS 485B (минус)	
7		Датчик дверцы		RS485A (плюс)		+U (7,2 В)	+U (7,2 В)	
8		Общий		RS485B (минус)		-U	-U	

Схема прибора построена и собрана на следующей элементной базе: модуль DSP-процессора (TMS320VC5409APGE160); высокоскоростное оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) 4x512 кВ; постоянное запоминающее устройство — 256 Мбайт (Compact Flash 256 Mb 133x); часы с прецизионным генератором; интерфейсные преобразователи; встроенный GSM (GPRS)-модуль стандарта GSM 900/1800; преобразователь Ethernet 10/100 Base-T; графический индикатор и клавиатура; источник питания.

В сумматоре имеется пять интерфейсов RS485, два — RS232 и Ethernet, предназначенные для связи с внешними устройствами. Интерфейс 2 можно использовать как RS232, так и RS485, выбор типа интерфейса осуществляется программно. Схема расположения клемм

интерфейсов и их обозначение приведены на рис. 2 и в табл. 2. Скорость обмена задается при программировании сумматора. Максимальная длина соединительного кабеля для интерфейса RS232 — 15 м, а для RS485 — 1,2 км. Интерфейсы могут использоваться в двух режимах:

1) сбора данных со счетчиков электроэнергии и подчиненных электронных сумматоров. При этом он является ведущим, так как иницирует обмен и формирует запросы подчиненным устройствам (рис. 3);

2) ответа на запросы ПК или других контроллеров. В этом случае сумматор является ведомым, так как отвечает на поступающие запросы с верхнего уровня системы учета (рис. 4).

Если ПК удален от сумматора, то рекомендуется для связи использовать интерфейс RS485.

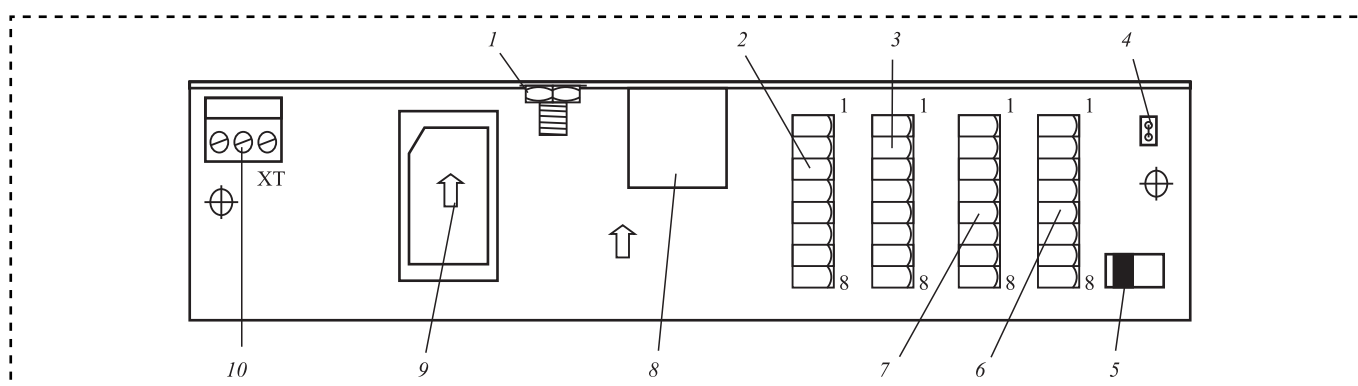


Рис. 2. Схема расположения клемм сумматора:

1 — активный вход GSM; 2 — разъем XP1; 3 — разъем XP2; 4 — технологический джампер; 5 — переключатель "Режим работы"; 6 — разъем XP4; 7 — разъем XP3; 8 — разъем RJ-45 (Ethernet); 9 — SIM-карта; 10 — сетевое питание

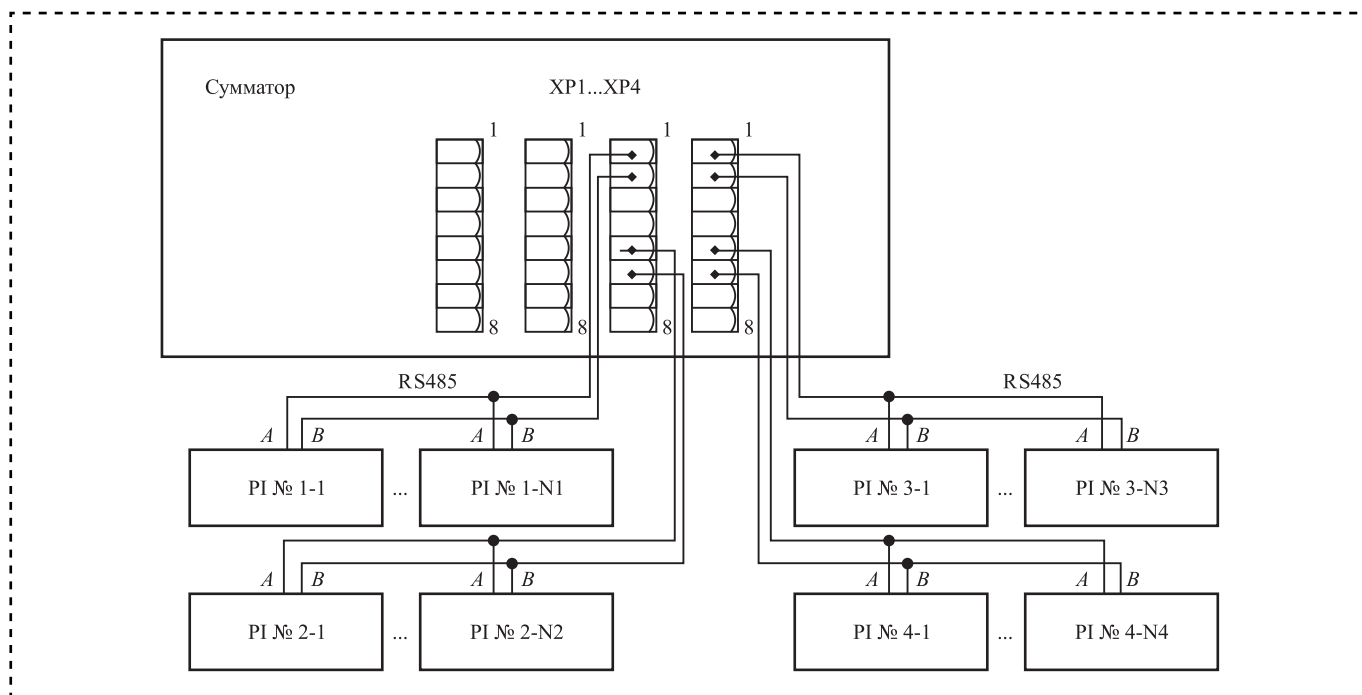


Рис. 3. Пример схемы подключения счетчиков к сумматору по интерфейсу RS485

Все интерфейсы кроме Ethernet могут работать как в ведущем, так и в ведомом режиме. Ethernet используется только для передачи информации на верхний уровень по локальной сети.

Любой из шести интерфейсов можно использовать для опроса и передачи данных как по прямой связи, так и посредством внешних преобразователей интерфейсов RS232—RS485 или разветвителей. Однотипные счетчики на одном интерфейсе должны иметь различные сетевые адреса.

На передней панели сумматора расположены цветной графический индикатор и органы управления. Информация о программировании и функционировании сумматора выводится на индикатор. Органами управления являются восемь кнопок (рис. 5 на стр. 2 обложки).

Работа с сумматором основана на системе интуитивно понятных меню. Первичное программирование прибора осуществляется с помощью программы "Конфигуратор СЭМ-3", установленной на ПК. По его окончании автомати-

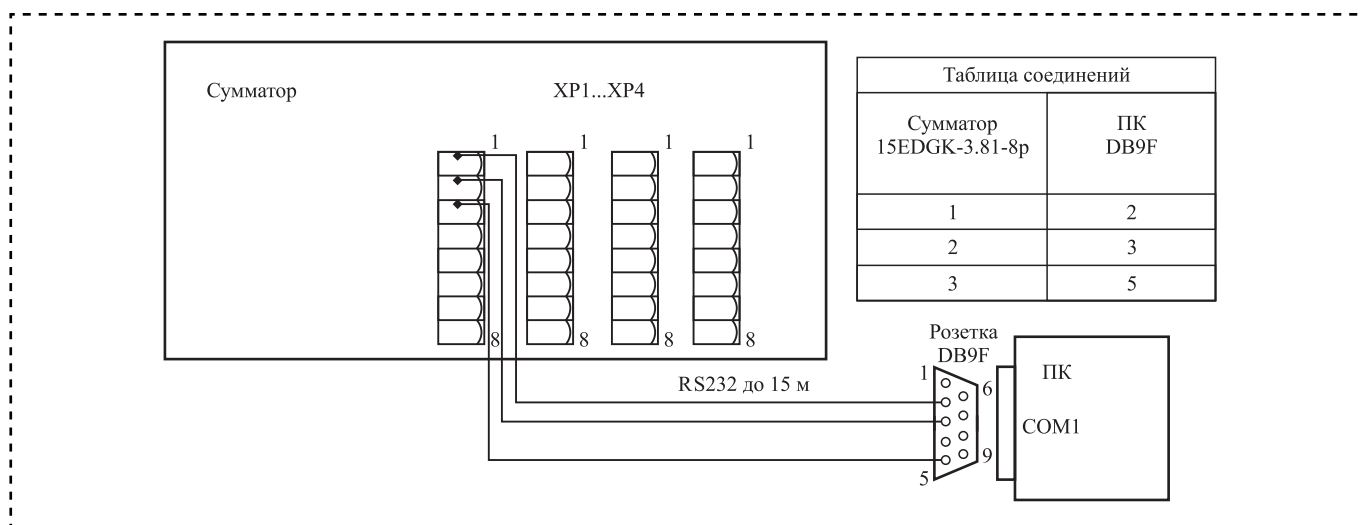


Рис. 4. Пример схемы подключения сумматора к ПК через интерфейс RS232



чески запускается сумматор. Выход в основное меню "Параметры" проводится нажатием кнопки ВВОД. В этом меню восемь вкладок меню функционирования сумматора, из которых первые пять одностраничные, остальные — многостраничные. Выбор необходимой вкладки осуществляется кнопками ▼ и ▲, при этом выбранная строка отмечается черным тоном на голубом фоне. Для просмотра информации по выбранному меню необходимо нажать кнопку ВВОД.

При выборе меню "Энергия по месяцам" на индикаторе сумматора отображается информация. В верхней части меню в полосе голубого цвета предоставляется выбор четырех видов данных для индикации энергии: Месяц, Год, Группа (или Канал) и Номер группы (или Канала). Активный вид данных выделяется синим цветом в рамке. С помощью кнопок ► и ◀ на панели сумматора можно переходить от выбора одного вида данных к другому, делая их активными. Изменение выбранного вида данных, осуществляется кнопками ▼ и ▲. После каждого нажатия в активном окне меняется надпись и автоматически происходит отображение значения запрошенного параметра энергии по соответствующему месяцу, группе и т.д. В нижней части экрана отображается название канала или группы. Выход на предыдущий уровень индикации, т.е. в меню "Параметры", осуществляется кнопкой ВОЗВРАТ. Меню "Энергия по суткам" полностью аналогично меню "Энергия по месяцам", но в полосе выбора вида данных дополнительно обеспечивается возможность выбора даты. Меню "Максимум по месяцам" и "Максимум по суткам" для индикации параметров мощности в обращении также аналогичны меню для индикации параметров энергии по месяцам и суткам, описанным выше.

В меню "Графическая информация" предоставлена возможность просмотра накопленной информации в графическом виде следующих параметров: получасовое потребление мощности по суткам, потребления энергии за месяц по суткам, графика 3-минутной мощности за последние 6 ч и мгновенные параметры. Выбор необходимого графика осуществляется кнопками ▲, ▼ и ВВОД. При этом можно изменить вид данных (день, месяц, год, канал), выбирая и изменяя эти значения. Повторное нажатие кнопки ВВОД при индикации получасовой или 3-минутной мощности обеспечивает переход

к представлению параметров мощности в цифровом виде. Меню мгновенные параметры содержит две вкладки: на первой отображается вектор полной мощности, а на второй пофазная векторная диаграмма. В меню "Накопленная энергия" предоставлена возможность просмотра показаний счетчиков (накопленной энергии). Меню "Энергия на начало месяца" обеспечивает возможность просмотра показаний счетчиков на начало месяца по всем заданным каналам глубиной 12 месяцев назад отдельно по тарифным зонам, а также целиком. Вывод информации проводят страничным способом по 16 каналов. Месяц и тарифную зону выбирают с помощью кнопок ►, ◀ и ▲, ▼, а переход между страницами — кнопками ►► и ◀◀. Меню "Текущая энергия" обеспечивает возможность просмотра текущих показаний счетчиков по всем заданным каналам отдельно по тарифным зонам, а также целиком. Текущие показания счетчиков — показания, считанные сумматором во время его последнего сеанса связи в соответствии с графиком опроса счетчиков и хранящиеся в памяти сумматора.

Меню "Технологические параметры" служит для просмотра и при необходимости изменения параметров программирования сумматора, а также просмотра общей технической информации о режиме его функционирования. Все вкладки этого меню — многостраничные. Меню "Параметры прибора" позволяет просмотреть информацию о сумматоре: его логический и заводской номера, версии загруженного программного обеспечения (ПО), наличии установленных модулей Ethernet и модема, а также при необходимости изменить логический номер сумматора.

Меню "Порты" на первой закладке позволяет просмотреть и при необходимости изменить параметры обмена по выбранному интерфейсу, параметры соединения модемов, корректировать разрешенные параметры, а также задавать график и смещение опроса. На второй закладке это меню позволяет просмотреть и при необходимости изменить параметры соединения модемов, а также сохранять или нет DUMP обмена. На третьей закладке можно установить период опроса и величину задержки (смещения) опроса в минутах и смещение 3-минутного опроса в секундах.

Если СЭМ-3 не оснащен модемом, то при нажатии на меню "Встроенный модем" появится





сообщение "Модем не установлен". На второй закладке можно установить график опроса точ-но так же, как и для обычного порта.

Меню "Устройства" на первой закладке по-зволяет просмотреть и при необходимости из-менить параметры настройки устройств ниж-него уровня, подключенных к сумматору, по типу связи, сетевому адресу, глубине полу-чения информации. Тип связи кодируется цифрой ноль, если обмен выполняется по выделенной линии связи, в остальных случаях цифра ука-зывает номер телефона для коммутируемых линий связи.

Меню "Устройства" на второй закладке по-зволяет просмотреть и при необходимости включить или отключить опрос выбранного устройства, коррекцию его времени, опрос 3-минутных срезов и мгновенных значений параметров качества электроэнергии. Меню "Устройства" на третьей закладке позволяет при необходимости выполнить урезку базы данных по выбранному устройству на заданное коли-чество дней в глубину. Для урезки необходимо кнопками ►, ◀ выбрать поле "Уровень урезки" и далее кнопками ▲, ▼ указать количество дней, по которым будет удалена получасовая информация для выбранного устройства. Также можно сохранять DUMP обмена или нет. При этом в карте брака удаленные дни будут отме-чены красным цветом, а во время следующего опроса данные будут восстановлены заново.

Меню "Каналы" позволяет просмотреть па-раметры программирования по каналам и из-менить виды измеряемой энергии и характе-ристики канала. Меню "Тарифы (Зоны суток)" позволяет просмотреть расписание тарифных зон суток по энергии и мощности за каждый месяц. Меню "Пароли устройств" позволяет просмотреть тип устройства и заданы либо нет пароли 1-го и 2-го уровней.

Вкладка "Общая информация" позволяет просмотреть информацию о сумматоре: его логический номер, заводской номер, версии загружаемого ПО, даты запуска и последней

коррекции брака, а также модель flash-памяти, ее емкости и распределения памяти. Вкладка "Журнал событий" дает возможность ретро-спективного просмотра действий и событий в сумматоре в процессе его функционирова-ния по двум выбранным журналам. Вкладка "Брак связи" дает возможность ретроспектив-ного просмотра нарушений в опросе счетчиков сумматором в процессе его функционирования по каналам и группам.

### Заключение

Сумматор может использоваться энергоснаб-жающими предприятиями, а также диспетчер-скими службами энергосистем для оперативно-го сбора информации о выработке и потребле-нии электроэнергии и введения ограничений на ее потребление. Сумматор позволяет орга-низовать многоуровневый учет выработки, рас-пределения и потребления энергии, контроль мощности и расхода энергии потребителями с любой схемой электроснабжения. Учет может быть организован как всего предприятия, так и его подразделений по зонам суток, суткам и за расчетный период.

### Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Эксперименталь-ные исследования характеристик перспективных ис-точников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. 150 с.
2. **Микаева С.А.** Производство приборов и систем с новейшими источниками света. М.: РУСАЙНС, 2018. 135 с.
3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Современные электронные системы и устройства. М.: РУСАЙНС, 2019. 186 с.
4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Промышленная электроника. Актуальные элетронные приборы, устрой-ства, установки и системы. М.: РУСАЙНС, 2020. 172 с.
5. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Электротехника. Казань: Бук, 2018. 228 с.
6. **Брысин А.Н., Микаева С.А.** Промышленная электроника. Импульсные устройства и основы микро-процессорной техники. Казань: Бук, 2019. 250 с.

# ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 621.892:544.72.05

DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-7-303-305

**М.В. Бойко**, канд. техн. наук, **И.В. Колесников**, д-р техн. наук,  
(Ростовский государственный университет путей сообщения),  
**С.Ф. Ермаков**, д-р техн. наук (Гомельский государственный университет  
им. Франциска Скорины, Республика Беларусь),  
**Т.Г. Бойко, А.А. Бичеров**  
(Ростовский государственный университет путей сообщения)  
E-mail: mikle-1@list.ru

## Повышение антифрикционной способности несущих поверхностей трибосистем при использовании смазочных материалов, легированных соединениями холестерина и комплексонами\*

*Рассмотрен трибоиндуцированный эффект повышения антифрикционных свойств смазочных материалов при совместном использовании соединений холестерина и маслорастворимых комплексонов. Установлено, что формирование граничных пленок обусловлено протеканием следующих процессов: образованием комплексных соединений между этаноламинами и ионами железа поверхностной оксидной пленки; удалением комплексов с поверхности трения; взаимодействием основы смазочного материала с неокисленным железом; образованием эпитропных структурированных слоев эфирами холестерина.*

*The tribo-induced effect of increasing the antifriction properties of lubricants with the combined use of cholesterol compounds and oil-soluble complexones is considered. It was found that the formation of boundary films is due to the following processes: the formation of complex compounds between ethanolamines and iron ions of the surface oxide film; removal of complexes from the friction surface; the interaction of the base of the lubricant with unoxidized iron; the formation of epitropic structured layers with cholesterol esters.*

**Ключевые слова:** смазочный материал, граничная пленка, антифрикционные свойства, этаноламины, жидкие кристаллы.

**Keywords:** lubricant, boundary film, antifriction properties, ethanolamines, liquid crystals.

### Введение

Современные исследования в области смазочных материалов (СМ) сосредоточены на решении следующих проблем: установление типов молекул, которые могут эффективно входить в область контакта при скольжении; ориентация молекул присадок и базовых масел в области трибоконтакта; влияние твердых поверхностей на молекулярную ориентацию смазочного материала в тонких пленках [1]. Более детальный анализ показывает, что при

граничной смазке высокая смазочная способность обеспечивается при локализации сдвига полностью или в значительной степени в полимолекулярном граничном слое, в котором сопротивление сдвигу минимально, а износ практически отсутствует [2–4]. Упорядоченное расположение молекул — одна из основных причин уменьшения трения [5]. Высокая смазочная способность достигается при реализации в зоне трения жидкокристаллической структуры смазочных слоев. В этой связи перспективным является исследование веществ, способных к образованию эпитропных структурированных слоев на поверхностях трения, в частности, эфиров холестерина [6, 7].

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-58-00004.

С другой стороны, синергетические взаимодействия между компонентами смазки связывают с образованием компактных и устойчивых граничных пленок, состоящих из смешанных адсорбированных слоев и сложных пленок, образованных в результате трения [8]. Чтобы понять механизм смазки для современных СМ, смазочные свойства рассматривают с точки зрения химического взаимодействия компонентов смазки и поверхности материала [9, 10].

Предполагается наличие синергетического эффекта при совместном использовании в СМ эфиров холестерина и веществ, образующих прочные химические связи с поверхностями металлов — комплексонами.

**Цель работы** — исследование трибоиндуцированного эффекта повышения антифрикционной способности несущих поверхностей трибосистем при использовании СМ, легированных соединениями холестерина и маслорастворимыми комплексонами.

### Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Испытания СМ проводили на машине трения торцевого типа по схеме "три пальца по диску". Пальцы и диски изготовлены из стали марки 30Х13,  $Ra$  0,6. Диаметр каждого пальца равен 1 см, расстояние от центра диска до середины дорожки трения составляло 35 мм. Испытания начинали с нагрузки 1 МПа и увеличивали на 1 МПа каждые 30 мин, а прекращали при экспоненциальном росте коэффициента трения.

Исследование вторичных поверхностных структур осуществляли при помощи ИК-Фурье спектроскопии с приставкой НПВО на приборе Nicolet 380.

Смазочная основа — высокоочищенное медицинское вазелиновое масло; присадки — моно-, ди- и триэтанол амины; холестерилловый эфир стеариновой кислоты (ХЭ-18).

Добавление в вазелиновое масло этаноламинов изменяет не только антифрикционные свойства масла, но и его максимальную нагрузочную способность (рис. 1 на стр. 3 обложки). При нагрузке 1 МПа коэффициенты трения масел, содержащих моно- и триэтанол амины, выше, чем у исходного вазелинового масла. Полагаем, что это связано с особенностями формирования граничных слоев в присутствии

присадок. Молекулы этаноламинов полярные и содержат в своем составе группы, способные к химическому взаимодействию с железом. За счет этого граничные слои образуются преимущественно из адсорбированных на поверхности комплексных соединений железа и этаноламинов. Напротив, вазелиновое масло, состоящее из молекул предельных углеводородов, химически инертно и не полярно, поэтому его взаимодействие с поверхностью металла происходит только за счет сил Ван-дер-Ваальса. Так как размер молекул присадок меньше, чем молекул вазелинового масла, то и граничные слои, сформированные в присутствии этаноламинов, имеют меньшую толщину и обладают худшими антифрикционными свойствами.

При нагрузке 3 МПа вид изменения коэффициентов трения в модифицированных маслах принципиально отличается от исходного масла. Наблюдается понижение коэффициентов трения, вызванное образованием антифрикционных слоев. В вазелиновом масле практически линейное увеличение коэффициентов трения связано с уменьшением вязкости СМ, вызванного разогревом системы.

Добавление этаноламинов увеличивает максимальную нагрузочную способность СМ с 3 МПа для чистого вазелинового масла до 4 МПа с моноэтаноломином, 9 МПа с диэтаноломином и 12 МПа с триэтаноломином.

Трибограммы вазелинового масла, содержащего совместно триэтанол амин и жидкокристаллическую присадку ХЭ-18, при нагрузке 3 МПа приведены на рис. 2 на стр. 3 обложки. Данная нагрузка выбрана потому, что коэффициенты трения масел, модифицированных этаноламинами, при ней максимальные. Формируемые эфирами холестерина эпитропные структурированные слои на поверхностях трения позволяют повысить антифрикционные свойства масел на 10...20 %.

По окончании испытаний на дорожках трения наблюдали формирование окрашенных граничных пленок (рис. 3 на стр. 3 обложки).

Исследование изменений химических связей в СМ при образовании граничных пленок на поверхностях трения проведено методом ИК-спектроскопии НПВО (рис. 4 на стр. 3 обложки).

Все представленные на рис. 4 спектры идентичны между собой. Несмотря на высокий фоновый шум, наблюдали полосы поглощения,



характерные для валентных колебаний связей С—Н ( $3000\text{--}2800\text{ см}^{-1}$ ), деформационных колебаний групп  $\text{CH}_2$  и  $\text{CH}_3$  ( $1463\text{ см}^{-1}$ ); деформационных колебаний групп  $\text{CH}_3$  ( $1377\text{ см}^{-1}$ ). Отсутствие в ИК-спектрах полос поглощения групп, присутствующих только в молекулах присадок, таких как  $-\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$ ,  $=\text{NH}$ ,  $\equiv\text{N}$ ,  $\text{C}=\text{O}$ , свидетельствует о том, что этаноламины и эфир холестерина не участвуют в процессах образования граничных пленок.

В то же время известно, что триэтаноламин образует прочные комплексные соединения с железом. Это широко применяется для маскирования железа, алюминия и марганца [3].

Полагаем, что роль этаноламинов сводится к растворению оксидного слоя на поверхности трения, а формирование граничной пленки происходит из молекул основы СМ при взаимодействии с неокисленным железом.

Полученные данные позволяют установить последовательность процессов, протекающих при образовании граничных пленок:

образование комплексных соединений между этаноламинами и ионами железа поверхностной оксидной пленки;

удаление комплексов с поверхности трения;

взаимодействие основы СМ с неокисленным железом, в результате чего формируются граничные смазывающие слои;

образование эфирами холестерина эпитропных структурированных слоев.

### Выводы

1. Трибоиндуцированный эффект повышения антифрикционной способности несущих поверхностей трибосистем при использовании СМ, легированных соединениями холестерина и маслорастворимыми комплексонами, обусловлен процессами взаимодействия компонентов СМ с металлической поверхностью трения.

2. Формирование граничных пленок в изученных СМ обусловлено следующими про-

цессами: образованием комплексных соединений между этаноламинами и ионами железа поверхностной оксидной пленки; удалением комплексов с поверхности трения; взаимодействием основы СМ с неокисленным железом; образованием эпитропных структурированных слоев эфирами холестерина.

### Библиографический список

1. Zhang S., Qiao Y., Liu Y., Ma L., Luo J. Molecular behaviors in thin film lubrication. Part one: Film formation for different polarities of molecules // *Friction*. 2019. Vol. 7. Iss. 4. P. 372–387.
2. Wazynska B., Okowiak J., Kolacz S., Malysa A. Tribological Properties of Parafine Oil Doped with Liquid Crystalline Mezogenes // *Opto-electronics review*. 2008. Vol. 16. No. 3. P. 267–270.
3. Amann T., Dold C., Kailer A. Complex fluids in tribology to reduce friction: Mesogenic fluids, ionic liquids and ionic liquid crystals // *Tribology International*. 2013. Vol. 65. P. 3–12.
4. Трибохимические процессы в моторном масле с добавлением наночастиц меди и азометинового лиганда / А.Г. Пономаренко и др. // *Трение и износ*. 2016. Т. 37. № 5. С. 565–572.
5. Lin J., Wang L., Chen G. Modification of Graphene Platelets and their Tribological Properties as a Lubricant Additive // *Tribology Letters*. 2011. Vol. 41. P. 209–215.
6. Об экранирующем действии этаноламинов и холестерических жидкокристаллических наноматериалов при фрикционном взаимодействии металлов в пластичных смазках / В.И. Колесников и др. // *Трение и износ*. 2019. Т. 40. № 1. С. 12–17.
7. Триботехнические характеристики химически неактивных поверхностей в смазочных материалах, легированных соединениями холестерина и жирных кислот / С.Ф. Ермаков и др. // *Трение и износ*. 2021. Т. 42. № 1. С. 13–23.
8. Zheng D., Wang X., Zhang M., Ju C. Synergistic Effects Between the Two Choline-Based Ionic Liquids as Lubricant Additives in Glycerol Aqueous Solution // *Tribology Letters*. 2019. Vol. 67. Iss. 2. P. 47.
9. Mori S. Chemical aspect for advanced lubricants // *Toraibarojisuto/Journal of Japanese Society of Tribologists*. 2019. Vol. 64. Iss. 3. P. 150–157.
10. Формирование граничных смазывающих пленок в присутствии комплексообразующих присадок / М.В. Бойко и др. // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2020. Т. 21. № 8. С. 367–371.





**С.А. Поляков**, д-р техн. наук  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИМАШ им. А.А. Благодирова РАН),  
**Е.М. Кулешова** (МГТУ им. Н.Э. Баумана)  
E-mail: kuleshova.em@mail.ru

## Анализ динамики возникновения триботехнических отказов в червячных передачах и методы их предотвращения

*Показана взаимосвязь возникновения триботехнических отказов в червячных передачах с ростом динамических нагрузок. Выявлена нелинейность роста интенсивности изнашивания во времени. Предложена экспоненциальная зависимость износа от времени с учетом роста коэффициента динамичности. Проведена вероятностная оценка ресурса червячных передач, с учетом экспоненциальной зависимости износа от времени, при использовании разных составов смазочных материалов.*

*The relationship between the tribotechnical failures in worm gears and the growth of dynamic loads is shown. The nonlinearity of the growth of the wear intensity over time is revealed. An exponential dependence of wear on time is proposed, taking into account the growth of the dynamic coefficient. A probabilistic assessment of the worm gear life was made, taking into account the exponential dependence of wear on time, when using different compositions of lubricants.*

**Ключевые слова:** червячная передача, вероятность отказа, ресурс, коэффициент динамичности, интенсивность изнашивания.

**Keywords:** worm gear, failure probability, service life, dynamic coefficient, wear intensity.

### Введение

Основная причина отказов червячных передач (ЧП) — процесс трения скольжения в зацеплении, который приводит к изнашиванию зубьев червячного колеса, а также при достижении определенных критических нагрузок может вызвать процесс заедания [1, 2]. По мере изнашивания в области, где соотношение износа с модулем зубьев превышает определенное значение, коэффициент динамичности монотонно растет. Это приводит к нелинейному росту интенсивности изнашивания. Подобные явления отмечались и раньше в отношении подшипников скольжения и шарниров [3]. Поскольку по мере изнашивания в сопряжении увеличивается зазор, а число оборотов сохраняется прежним, то выборка большего зазора за прежнее время вызывает дополнительное ускорение деталей, т.е. динамическая составляющая нагрузки в сопряжении растет. Поскольку интенсивность изнашивания, как правило, монотонно зависит от нагрузки, то рост нагрузки вызывает соответствующий рост интенсивности изнашивания.

Применение модифицированных смазочных материалов (СМ) приводит к снижению скорости роста динамических нагрузок и, следовательно, к изменению формы зависимости износа от времени. Данное явление снижает вероятность возникновения триботехнических отказов ЧП.

**Цель работы** — определение зависимости износа от времени, с учетом роста динамических нагрузок, и с последующей вероятностной оценкой ресурса ЧП при использовании разных составов СМ.

### Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Испытывали червячный редуктор 5Ч-80 при проведении стендовых испытаний с использованием масла ТМ-5-18 с добавкой нанодисперсного коллоидного раствора частиц полититаната калия в олеиновой кислоте ("Стрибойл") и с использованием чистого масла ТМ-5-18.

Если рассмотреть влияние изнашивания на динамическую нагрузку, необходимо отметить,





что при достижении некоторого уровня изношенности коэффициент пропорциональности  $K_d$  монотонно растет с ростом износа, т.е. если принять в первом приближении, что рост пропорциональный, можно записать:

$$K_d = \frac{h_n}{K_a}, \quad (1)$$

где  $h_n$  — износ;

$K_a$  — коэффициент, определяющий из графиков зависимости коэффициента динамичности от износа [1].

Скорость изнашивания может быть определена по формуле

$$\frac{dh_n}{dt} = J^* \cdot v,$$

где  $J^*$  — зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки;

$v$  — скорость относительного скольжения.

Зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки при использовании минерального масла имеет вид

$$J = K_u \left[ \frac{p}{HB_2} \right]^m,$$

где  $p$  — контактное давление (по Герцу);

$HB_2$  — твердость по Бринеллю материала червячного колеса;

$K_u, m$  — экспериментально устанавливаемые коэффициенты.

Для модифицированного масла зависимость интенсивности изнашивания от нагрузки сильно отличается, и выражается соотношением [4]:

$$J = K_u \left[ \frac{p - p_0}{HB_2} \right]^m,$$

где  $p_0$  — критическое давление пленкообразования.

Увеличение  $p_0$  расширяет зону изнашивания с высокой износостойкостью.

Тогда, скорость изнашивания при использовании минерального масла с учетом динамических составляющих:

$$\frac{dh_n}{dt} = K_u K_d \left[ \frac{p}{HB_2} \right]^m v.$$

Скорость изнашивания при использовании минерального масла с добавкой:

$$\frac{dh_n}{dt} = K_u K_d \left[ \frac{p - p_0}{HB_2} \right]^m v.$$

С учетом соотношения (1) скорость изнашивания при использовании минерального масла:

$$\frac{dh_n}{dt} = K_u \frac{h_n}{K_a} \left[ \frac{p}{HB_2} \right]^m v.$$

Скорость изнашивания при использовании минерального масла с добавкой:

$$\frac{dh_n}{dt} = K_u \frac{h_n}{K_a} \left[ \frac{p - p_0}{HB_2} \right]^m v.$$

Таким образом, скорость изнашивания пропорциональна его текущей величине. Это значит, что зависимость износа от времени имеет экспоненциальный характер, при использовании минерального масла будет выражаться соотношением:

$$h_n(t) = h_0 \exp \left[ \frac{K_u}{K_a} \left( \frac{p}{HB_2} \right)^m vt \right]. \quad (2)$$

Зависимость износа от времени при использовании минерального масла с добавкой определяется как

$$h_n(t) = h_0 \exp \left[ \frac{K_u}{K_a} \left( \frac{p - p_0}{HB_2} \right)^m vt \right]. \quad (3)$$

Коэффициент динамичности будет оказывать влияние на форму экспоненциальной кривой. А вид зависимости износа от нагрузки будет влиять на ресурс. Величины, входящие в формулу, как правило, известны, в данном случае коэффициент  $K_a$  определяется из графиков зависимости коэффициента динамичности от износа,  $K_u$  для случая с модифицированным СМ изменяется пропорционально интенсивности изнашивания [1].

Существенную роль в процессе изнашивания играет коэффициент динамичности. В работе [1] он определялся через неравномерность вращения тихоходного вала, т.е. чисто кинематически, с последующим определением силового фактора через жесткость. Однако жесткость редуктора имеет при ее определении ряд составляющих, оценка которых зависит от трудно учитываемых факторов, что вносит неопределенность в данную величину. В то же время показания тензодатчиков, установлен-

ных по стандартной схеме на элементах упругой подвески валов, позволяют оценить силовой фактор, практически, напрямую, что упрощает задачу [5].

Показатель динамичности для быстроходного вала ЧП можно ввести в виде коэффициента прироста динамичности быстроходного вала [6]:

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

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

Формула (4) показывает, как амплитуда колебаний может изменяться в связи с ростом тормозного момента, в том числе, в случае превышения номинального момента. Предложение данной формулы в работе [6] связано с явлением автоколебаний, которые возникают и могут увеличиваться в связи с ростом силы трения в контакте ЧП, обусловленном ростом тормозного момента. Для анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) удобно использовать метод быстрого преобразования Фурье [7]. Данный метод позволяет построить распределение амплитуд колебаний моментов в зависимости от значений соответствующих частот, что дает возможность выявить доминирующую частоту [7]. Обработанные методом быстрых преобразований Фурье данные по изменениям относительной амплитуды  $\Delta T_{\text{эд}}$  колебаний момента на быстроходном валу для основных частот в процессе испытаний дают возможность выявить доминирующую частоту

колебаний, на которую приходится основной объем мощности, расходуемой при колебаниях. Эта частота соответствует частоте автоколебаний, которая определяется характером контактного взаимодействия в зацеплении [6]. Использование значения относительной амплитуды  $\Delta T_{\text{эд}}$ , определяющей значение коэффициента динамичности быстроходного вала, позволяет не только оценить динамичность ЧП с разными СМ, но и ранжировать эти материалы по их противозадирному действию в зависимости от величины нагружающего момента, задав предельное значение коэффициента динамичности. Анализ зависимости амплитуды момента на быстроходном валу для доминирующей частоты

$$T'_{\text{эд}} = \frac{T_{\text{max}}}{T_{\text{эд}}} 100\%,$$

где  $T_{\text{max}}$  — максимальное значение размаха колебания момента на доминирующей частоте от тормозного момента позволяет построить аналитические зависимости  $K_d$  от нагрузки.

Коэффициент динамичности — случайная величина, поэтому экспериментально через анализ АЧХ получаем распределение  $K_d$ . Среднеквадратическое отклонение  $K_d$  рассчитываем по формуле

$$\sigma_{K_d} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{di} - \bar{K}_d)^2}{n}},$$

где  $\bar{K}_d$  — среднее значение  $K_d$ ;  
 $K_{di}$  — отдельные значения  $K_d$ ;  
 $n$  — размер выборки.

Для примера на рис. 1 приведено распределение  $K_d$  при номинальном тормозном моменте  $T_{\text{тор}} = 260 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Для оценки ресурса целесо-

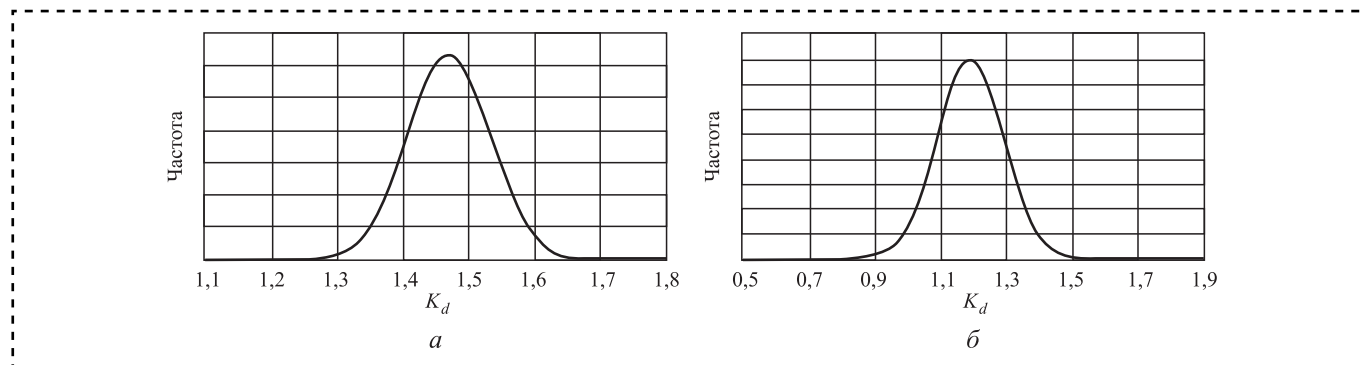
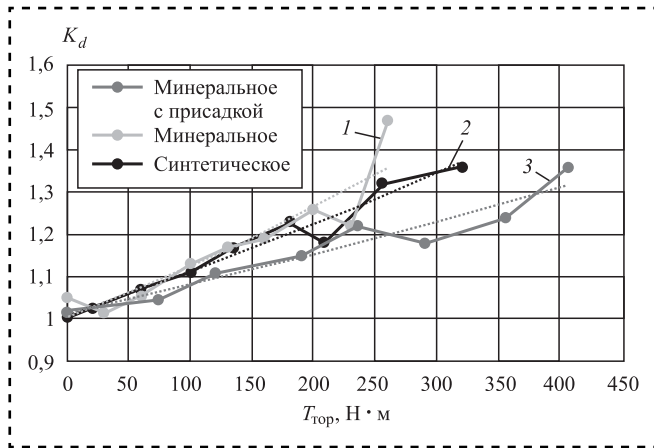


Рис. 1. Распределение коэффициента динамичности при номинальном тормозном моменте  $T_{\text{тор}} = 260 \text{ Н}\cdot\text{м}$ : а — минеральное масло; б — минеральное масло с добавкой "Стрибойл"



**Рис. 2. Зависимость коэффициента динамичности быстроходного вала от тормозного момента при разных составах СМ:**

$$1 - y = 1,0034e^{0,012x}; \quad 2 - y = 1,0107e^{0,001x}; \quad 3 - y = 1,0143e^{0,006x}$$

образно использовать среднее значение этой величины. На рис. 2 показаны графики зависимости среднего значения коэффициента динамичности быстроходного вала от тормозного момента для разных смазочных материалов.

По мере повышения антифрикционных свойств СМ скорость роста коэффициента динамичности быстроходного вала ЧП снижается, что, в свою очередь, уменьшает вероятность заедания и увеличивает ресурс по критерию заедания.

В то же время уменьшение  $K_d$  с ростом нагрузки позволяет оценить изменение ресурса по критерию предельного износа. Предельный износ зависит от предельно допустимого коэффициента динамичности  $[K_d] = 1,3...1,4$  [1]:

$$\Pi = [K_d] K_a,$$

где  $K_a$  — коэффициент пропорциональности между предельным износом и  $[K_d]$ , который

определяется из эксперимента и соответствует динамическому приросту момента быстроходного вала на единицу износа зуба червячного колеса.

Коэффициент  $K_a = 2,22$  экспериментально определен в работе [1]. Из графика зависимости  $K_d$  от износа для испытуемого редуктора ЧР80 определим, что при достижении предельно допустимого коэффициента динамичности  $K_d = 1,35$  износ составляет 3 мм, что соответствует предельному значению.

Предельный износ является случайной величиной, распределение которого определяется через распределение  $K_d$  (рис. 3).

Полученные экспериментальные данные позволяют построить график зависимости среднего значения предельного износа от нагрузки при использовании минерального масла без добавки и минерального масла с добавкой "Стрибойл" с учетом роста коэффициента динамичности (рис. 4) [8].

Предельный износ уменьшается по мере увеличения нагрузки и по мере роста коэффициента динамичности. Для случая использования чистого минерального масла снижение этой величины происходит значительно быстрее, чем для случая с использованием добавки.

Предложенная зависимость имеет вид [5]:

$$\Pi = \frac{[K_d] K_a}{K_d}. \quad (5)$$

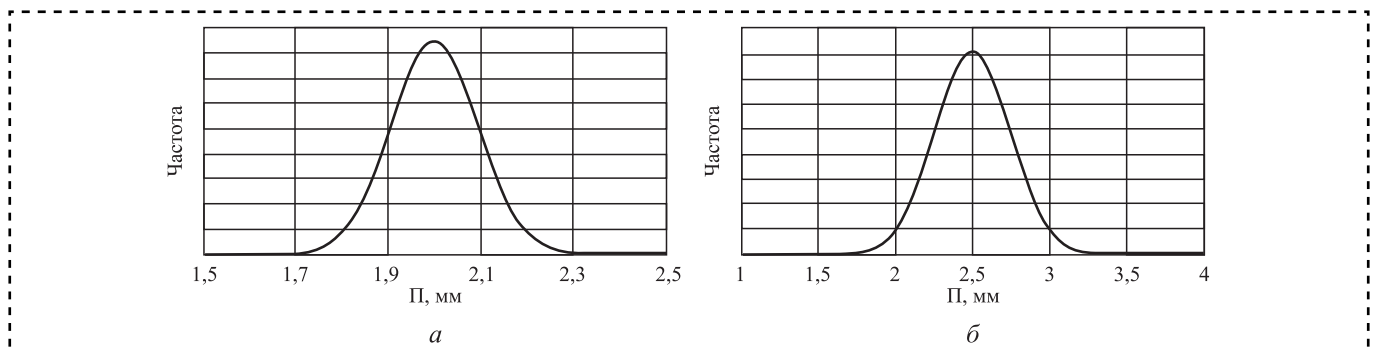
Таким образом, определить остаточный ресурс ЧП можно по формуле [5]:

$$T = \frac{[K_d] K_a}{2bGn_2JK_d}, \quad (6)$$

где  $b$  — полуширина площадки контакта по Герцу;

$G$  — геометрический параметр;

$n_2$  — частота вращения колеса.



**Рис. 3. Распределение предельного износа при номинальном тормозном моменте  $T_{\text{top}} = 260 \text{ Н} \cdot \text{м}$ : а — минеральное масло; б — минеральное масло с добавкой "Стрибойл"**

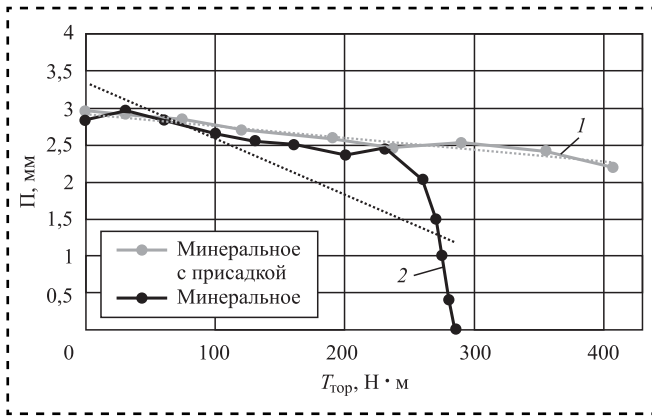


Рис. 4. Зависимость предельного износа от нагрузки при разных составах СМ:

$$1 - y = -0,0017x + 2,9403; \quad 2 - y = -0,0077x + 3,3543$$

Подобный подход позволяет оценить в первом приближении время безотказной работы ЧП по критерию изнашивания и заедания, однако он обладает рядом недостатков. Во-первых, подобная оценка должна носить вероятностный характер, т.е. опираться на определенную статистику. Кроме того, в нем не учитываются факторы эволюции интенсивности изнашивания и коэффициента динамичности, предполагающие нелинейный рост интенсивности изнашивания во времени. Поэтому выражение (6) необходимо скорректировать — износ в функции времени (динамика изнашивания) и соответствующая интенсивность изнашивания должны быть представлены в виде функций (2), (3). Графики функции износа от времени для разных составов СМ представлены на (рис. 5). Также на графики нанесены распределения предельного износа (см. рис. 3), по которым определяли диапазоны значений ресурса.

Для разных СМ формы зависимости износа от времени существенно отличаются. При

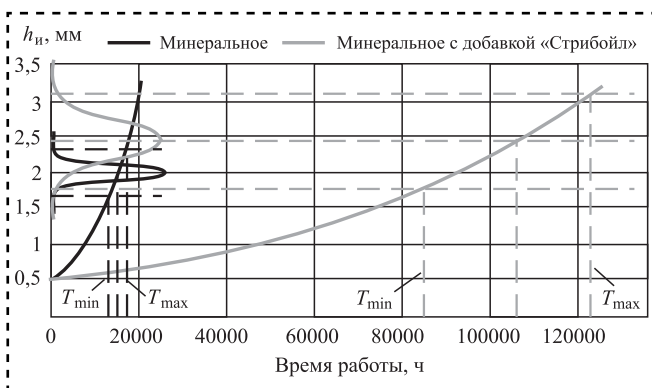


Рис. 5. Зависимость износа зуба червячного колеса от времени работы при разных составах СМ

введении добавки к СМ скорость роста износа падает, и соответственно, увеличивается время безотказной работы.

Вероятность отказа оцениваем через вероятностную оценку ресурса, подставив в формулы (2), (3) вместо текущего износа предельный износ по формуле (5) и выразив время безотказной работы  $T$  через  $t$ . Ресурс при использовании

минерального масла

$$T = \ln \frac{\Pi}{h_0 \frac{K_u}{K_a} \left( \frac{p}{HB_2} \right)^m v}; \quad (7)$$

минерального масла с добавкой

$$T = \ln \frac{\Pi}{h_0 \frac{K_u}{K_a} \left( \frac{p - p_0}{HB_2} \right)^m v}. \quad (8)$$

С учетом того, что предельный износ — случайная величина, в соответствии с графиками (см. рис. 5) для минерального масла ресурс находится в диапазоне 13 000...17 500 ч, для минерального масла с добавкой — 85 000...122 500 ч. Для прогнозирования ресурса экспоненциальная зависимость может быть заменена степенной с определением показателя степени через замену экспоненты полиномиальным рядом. Подобный прием может быть использован, если определено минимальное значение ресурса по формуле [МР 151-85. М.: ВНИИНМАШ, 1985]:

$$T_{\min} = \sqrt[m]{\frac{\Pi \alpha}{y_{\max}}},$$

где  $y_{\max}$  — максимальная скорость изнашивания, для минерального масла с добавкой  $y_{\max} = 4,5 \cdot 10^{-5}$ , для минерального масла  $y_{\max} = 0,4$  [9];

$\Pi$  — предельный износ (см. рис. 4) при  $T_{\text{top}} = 260 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , для минерального масла с добавкой  $\Pi = 2,5 \text{ мм}$ , а для чистого минерального масла  $\Pi = 2 \text{ мм}$  (см. рис. 4);

$\alpha$  — коэффициент, описывающий зависимость износа от наработки при постоянных условиях изнашивания.

В первом приближении коэффициент  $\alpha$  принимаем равным единице [9], однако в силу зависимости скорости изнашивания от нагрузки и роста коэффициента динамичности по мере



изнашивания, эту величину определяем из анализа динамики изнашивания, показанной в формулах (2), (3). При этом заменить экспоненциальную форму на степенную можно, используя разложение экспоненты (или логарифма (7), (8)) в степенной ряд. В нашем случае средний износ в зависимости от времени для разных СМ аппроксимирован следующими формулами:

минеральное масло с добавкой "Стрибойл":

$$h = 1,8 \cdot 10^{-6} t^{1,2} + 0,56;$$

минеральное масло:

$$h = 4,5 \cdot 10^{-9} t^{1,8} + 0,56.$$

Таким образом,  $\alpha = 1,2$  при использовании минерального масла с добавкой "Стрибойл", при использовании минерального масла —  $\alpha = 1,8$ .

Скорость изнашивания, как и предельный износ, является случайной величиной. Для определения закона распределения скорости изнашивания зубьев червячного колеса необходимо использовать аппарат планирования и регрессионного анализа экспериментов. Вид зависимости скорости изнашивания от нагрузки сильно отличается для разных составов СМ [9]. Для вероятностной оценки ресурса использовали среднее значение предельного износа, которое определяли из графика (см. рис. 4).

Таким образом, в вероятностном определении ресурса используют две случайные величины — скорость изнашивания и предельный износ.

Порядок проведения вероятностной оценки ресурса ЧП состоит из следующих действий:

1) проведение износных испытаний и определение зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки;

2) определение зависимости коэффициента динамичности от нагрузки по изложенной методике через АЧХ;

3) построение плана эксперимента и определение закона распределения скорости изнашивания, построение зависимости износа от времени;

4) определение предельного износа, с учетом роста коэффициента динамичности по графику зависимости предельного износа от нагрузки.

5) расчет ресурса.

### Пример расчета ресурса ЧП с учетом нелинейности износа во времени для разных составов СМ

Определим минимальный ресурс. Здесь и далее индекс (1) обозначает наличие пленкообразующей добавки, индекс (2) — отсутствие добавки:

$$T_{\min 1} = \alpha_1 \sqrt{\frac{\Pi_1 \alpha_1}{y_{\max 1}}} = 1,2 \sqrt{\frac{2,5 \cdot 1,2}{4,5 \cdot 10^{-5}}} = 10\,426 \text{ ч};$$

$$T_{\min 2} = \alpha_2 \sqrt{\frac{\Pi_2 \alpha_2}{y_{\max 2}}} = 1,8 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,8}{0,4}} = 3 \text{ ч}.$$

Определим 50%-ный ресурс по формуле:

$$T_{1\gamma=50} = \frac{\Pi_1}{y_1} - T_{\min 1} = 119\,588 \text{ ч};$$

$$T_{2\gamma=50} = \frac{\Pi_2}{y_2} - T_{\min 2} = 18\,361 \text{ ч}.$$

Средний ресурс найдем из соотношения

$$\bar{T} = \frac{T_{\gamma=50}}{w_{\gamma=50}},$$

где  $w_{\gamma=50}$  — коэффициент, определяемый в соответствии с [МР 151-85. М.: ВНИИНМАШ, 1985],  $w_{\gamma=50} = 0,99$ .

Тогда

$$\bar{T}_1 = 120\,796 \text{ ч}; \quad \bar{T}_2 = 18\,546 \text{ ч}.$$

Среднеквадратическое отклонение ресурса:

$$\sigma_T = \bar{T} v_T,$$

где  $v_T$  — коэффициент вариации ресурса, определяется в соответствии с [МР 151-85. М.: ВНИИНМАШ, 1985].

Тогда

$$\sigma_{T1} = 35\,030 \text{ ч}; \quad \sigma_{T2} = 1854 \text{ ч}.$$

Определим 80%-ный ресурс:

$$T_{\gamma=80} = T_{\gamma=50} \frac{w_{\gamma=80}}{w_{\gamma=50}}.$$

Значение соотношения  $\frac{w_{\gamma=80}}{w_{\gamma=50}}$  определено по

известному значению  $v_T$ , тогда

$$T_{1\gamma=80} = 78\,517 \text{ ч}; \quad T_{2\gamma=80} = 12\,055 \text{ ч}.$$



## Окончательные значения ресурса ЧП при использовании разных составов СМ

Вероятность безотказной работы, %	Ресурс ЧП, ч	
	Минеральное масло с добавкой "Стрибойл"	Минеральное масло
50	$t_{1\gamma=50} = T_{1\gamma=50} + T_{см1} = 130\ 014$	$t_{2\gamma=50} = T_{2\gamma=50} + T_{см2} = 18\ 364$
80	$t_{1\gamma=80} = T_{1\gamma=80} + T_{см1} = 88\ 944$	$t_{2\gamma=80} = T_{2\gamma=80} + T_{см2} = 12\ 058$

С учетом смещения  $T_{см}$  получаем окончательные значения ресурсов (таблица).

Данные, отображенные в таблице, согласуются с данными, полученными на рис. 5, и подтверждают тот факт, что применение модифицированных СМ приводит к снижению вероятности возникновения триботехнических отказов ЧП, и соответственно, к увеличению ресурса.

### Заключение

Показано, что зависимость износа от времени имеет экспоненциальный характер. В свою очередь, учет нелинейности роста интенсивности изнашивания во времени (анализ динамики изнашивания) повышает точность оценки времени безотказной работы ЧП по критерию изнашивания и заедания. По результатам проведения вероятностной оценки ресурса ЧП, можно сделать вывод о благоприятном влиянии добавки "Стрибойл" к минеральному маслу на ресурс ЧП.

### Библиографический список

1. Андриенко Л.А., Вязников В.А. Ресурс работы червячной передачи по критерию изнашивания // Известия вузов. Машиностроение, 2011. № 4. С. 3–6.
2. Павлов В.Г. Ресурс работы червячной передачи по критерию износа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 5. С. 44–48.

3. Шепер М.Н. Испытания металлоплакирующих смазочных материалов, их разработка и внедрение. В кн.: Избирательный перенос в тяжелонагруженных узлах трения / под ред. Д.Н. Гаркунова. М.: Машиностроение, 1982. С. 162–174.

4. Поляков С.А., Лычагин В.В., Кулешова Е.М. Оценка влияния смазочных материалов на ресурс червячных передач по критерию предельного износа // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 8. С. 345–349.

5. Трение, изнашивание механизмов, смазочные материалы: учебно-методическое пособие / С.А. Поляков и др. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 47 с.

6. Поляков С.А., Гончаров С.Ю., Куксенова Л.И. Разработка метода оценки работоспособности червячных передач на основе анализа их триботехнических показателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 5. С. 81–87.

7. Анализ контактного взаимодействия в червячных передачах в связи с разработкой модели их нелинейных колебаний / С.А. Поляков и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении 2017. № 11. С. 510–518.

8. Кулешова Е.М., Поляков С.А. Оценка ресурса червячных передач с учетом изменения интенсивности изнашивания и скорости роста коэффициента динамичности при использовании пленкообразующих добавок // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 10. С. 460–465.

9. Кулешова Е.М. Оценка влияния эволюции показателей динамичности червячного зацепления на параметры технического состояния в процессе эксплуатации // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2021. № 4. С. 170–175.



**М.П. Шишкарев**, д-р техн. наук  
(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)  
E-mail: shishkarevm@mail.ru

## Модернизация адаптивной фрикционной муфты с переменным коэффициентом усиления (второй вариант)

*Найдены зависимости распорной силы и коэффициента усиления обратной связи от текущего значения коэффициента трения, при которых адаптивная фрикционная муфта с переменным коэффициентом усиления обладает теоретически идеальной нагрузочной характеристикой. Доказано, что реальным способом увеличения коэффициента кратности повышения номинальной нагрузочной способности муфты является увеличение числа пар трения фрикционной группы.*

*The dependences of the spacer force and feedback gain on the current value of the friction coefficient are found, for which an adaptive friction coupling with a variable gain value has a theoretically ideal load characteristic. It is proved that the real way to increase the coefficient of multiplicity of increasing the rated load capacity of the coupling is to increase the number of friction pairs of the friction group.*

**Ключевые слова:** адаптивная фрикционная муфта, коэффициент усиления, переменный, модернизация, коэффициент трения, нагрузочная способность, коэффициент кратности.

**Keywords:** adaptive friction clutch, amplification coefficient, variable, modernization, friction coefficient, load capacity, coefficient of expansion.

### Введение

Теоретическая точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты (АФМ) первого поколения с переменным коэффициентом усиления (КУ) устройства обратной связи позволяет отнести ее к предохранительным фрикционным муфтам с так называемой "идеальной" нагрузочной характеристикой [1, 2].

"Идеальная" нагрузочная характеристика, отражаемая графиком зависимости предельного вращающего момента АФМ от коэффициента трения, соответствует графику, представляющему собой прямую, параллельную оси абсцисс, т.е. оси координатной системы  $T_{\text{п}} - f_i$  (где  $T_{\text{п}}$  — предельный вращающий момент АФМ,  $f_i$  — текущий коэффициент трения).

Данная особенность рассматриваемой АФМ объясняется тем, что управляющее устройство (УУ) обратной связи построено на принципе изменения угла давления чувствительных элементов и, соответственно, КУ при изменении коэффициента трения.

Указанный процесс осуществляется автоматически за счет перекачивания чувствительных

элементов (тел качения УУ) по специальным гнездам, боковые стенки которых очерчены кривыми линиями.

Но переменный КУ муфты в действительности не обеспечивает достижение точности срабатывания, соответствующей точности срабатывания "идеальной" предохранительной муфты [3, 4].

Для срабатывания АФМ с переменным КУ необходим дополнительный внешний силовой импульс, поскольку для срабатывания муфты при номинальном вращающем моменте требуется деформация упругого элемента, обусловленная перемещением чувствительных элементов УУ обратной связи. Это, очевидно, вносит перегрузку в кинематическую цепь привода машины.

Перегрузка, вносимая в кинематическую цепь привода машины АФМ первого поколения с переменным значением КУ обратной связи при срабатывании, зависит не только от абсолютного текущего значения коэффициента трения, при котором срабатывает АФМ, но и от того значения коэффициента трения, которое

предшествовало значению, соответствующему срабатыванию муфты [5].

В работе [6] предложен вариант АФМ с переменным КУ обратной связи, в которой использованы уменьшенные значения угла давления чувствительных элементов УУ. Данное решение основано на том, что уменьшение угла давления в определенных пределах приводит к снижению точности срабатывания АФМ, адекватной реальной точности срабатывания АФМ с теоретически "идеальной" формой нагрузочной характеристики.

Эксплуатационный эффект от такого решения заключается в повышении номинальной нагрузочной способности модернизированного варианта АФМ за счет меньших значений распорной силы, действующей между элементами УУ, при одинаковой с "идеальной" АФМ точности срабатывания.

Реальная точность срабатывания "идеальной" АФМ и ее модернизированного варианта в ряде случаев применения их на практике не удовлетворяет требованиям по надежной защите узлов и деталей приводов машин от выхода их из строя в результате действия перегрузок [6].

**Задача исследования** — синтез АФМ первого поколения с переменным значением КУ обратной связи, обладающей повышенной номинальной нагрузочной способностью и более высокой точностью срабатывания.

### Основная часть

Рассмотрим в качестве предмета исследования АФМ первого поколения с переменным КУ обратной связи (рис. 1).

Муфта состоит из полумуфт 1 и 2, кинематическая связь между которыми в окружном направлении осуществляется посредством пакета фрикционных дисков 3 и 4. Диски 3 связаны в окружном направлении с нажимным диском 5, который лишен кинематической связи со ступицей полумуфты 1 в осевом и окружном направлениях, за исключением незначительного трения, не учитываемого при расчетах. Диски 4 связаны в окружном направлении с барабаном полумуфты 2. Кинематическая связь дисков 3 и 4 с соответствующими элементами муфты не ограничивает осевого перемещения дисков.

Управляющее устройство обратной связи муфты состоит из тел качения 6, которые раз-

мещены в гнездах с наклонными боковыми стенками, выполненных в опорном диске 7 и на обращенной к нему торцевой поверхности упорного диска 8, жестко закрепленного на ступице полумуфты 1.

Боковые стенки гнезд очерчены кривыми линиями, выпуклыми в направлении тел качения 6 (рис. 1, б, сечение А-А), поэтому угол между касательной к образующей боковой стенки гнезда и осью гнезда увеличивается по мере удаления от дна гнезда к его периферии.

Опорный диск 7 связан в окружном направлении с нажимным диском 5 посредством направляющей шпонки 9 и подпружинен относительно нажимного диска пружиной 10.

Силовое замыкание пакета фрикционных дисков 3 и 4 осуществляется пружиной 11, которая передает усилие натяжения на нажимной диск 5 через упорный подшипник 12.

Конструктивно-компоновочная схема фрикционной группы АФМ выполнена по типу "все пары трения ведущие" [7], на что указывает упорный подшипник 13, установленный между крайним левым фрикционным диском 4 и упорным диском 8. Таким образом, вся нагрузка от полумуфты 1 на фрикционную группу передается телами качения 6 УУ.

При передаче вращающего момента между телами качения и боковыми стенками гнезд, в которых они размещены, возникает распорная сила  $F_p$ , вектор которой направлен противоположно вектору силы  $F_n$  натяжения пружины 11 (рис. 1, б, сечение А-А).

В результате этого опорный диск 7 перемещается вправо (рис. 1, а), если распорная сила в первоначальный момент ее действия превы-

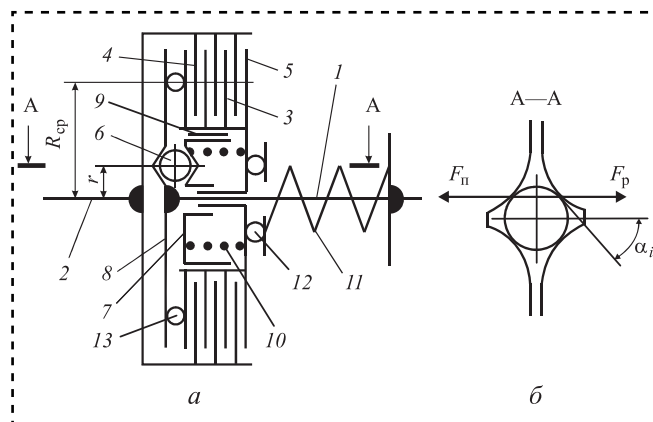


Рис. 1. Принципиальная схема АФМ первого поколения с переменным КУ обратной связи



шает суммарную силу натяжения пружины 10 и силу трения между нажимным диском 5 и направляющей шпонкой 9.

В данном случае увеличивающаяся сила натяжения пружины 10 передается на нажимной диск, что приводит к уменьшению силы прижатия друг к другу фрикционных дисков 3 и 4. Это позволяет автоматически, в зависимости от передаваемой нагрузки и коэффициента трения, регулировать значение предельного вращающего момента АФМ при ее срабатывании.

Если перегрузка в приводе машины наступает при повышенном случайным образом значении коэффициента трения, то муфта не срабатывает при номинальном (настроечном) значении вращающего момента. В данном случае при увеличении нагрузки происходит рост распорной силы  $F_p$ , действующей на опорный диск 7, в результате чего он перемещается вправо, при этом увеличивается угол давления  $\alpha_i$  (рис. 1, б).

Сила трения между фрикционными дисками 3 и 4 при этом уменьшается и вследствие уравнивания момента сил трения с внешней нагрузкой происходит срабатывание муфты.

Профиль боковых стенок гнезд под тела качения б выбран таким, что для каждого их положения относительно стенок муфта настроена на передачу номинального (настроечного) вращающего момента при определенном текущем коэффициенте трения [1].

Запишем в общей форме формулу для определения предельного вращающего момента "идеальной" АФМ [2]:

$$T_{п.и} = zR_{cp}f_i(F_p - F_{p,i}), \quad (1)$$

где  $z$  — число пар трения фрикционных дисков 3 и 4;

$R_{cp}$  — средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков 3 и 4;

$F_{p,i}$  — текущая распорная сила УУ обратной связи.

По условию поставленной задачи должно выполняться условие  $T_{п.и} = \text{const}$ . В качестве постоянного вращающего момента примем его номинальное значение  $T_H$  [1, 2]:

$$T_H = \text{const}.$$

Поскольку, кроме указанного выше условия, задачей исследования является повышение

нагрузочной способности "идеальной" АФМ, запишем следующее соотношение:

$$T_H = znF_pR_{cp} \frac{f_{\min}}{1 + zC_{\min}f_{\min}}, \quad (2)$$

где  $n$  — коэффициент,  $n > 1$ ;

$f_{\min}$  — минимальный коэффициент трения;

$C_{\min}$  — минимальный КУ обратной связи:

$$C_{\min} = \frac{R_{cp}}{r} \text{tg } \alpha_{\min},$$

$\alpha_{\min}$  — минимальный угол давления тел качения УУ;

$r$  — радиус окружности, на которой расположены тела качения б (см. рис. 1, а).

Соотношение (2) записано для варианта АФМ, у которой конструктивно-компоновочная схема фрикционной группы выполнена по типу "все пары трения ведущие" [7], что соответствует приведенной выше принципиальной схеме АФМ, и с учетом выводов, сделанных в работе [8] и относящихся к настроечному значению коэффициента трения.

Исходя из формы кривой, очерчивающей боковую стенку гнезда под тела качения б (см. рис. 1, б, сечение А—А), угол  $\alpha_{\min}$  соответствует максимальному погружению тела качения в гнездо.

Принимая  $T_{п.и} = T_H$  в формуле (1) и приравняв друг к другу правые части соотношений (1) и (2), находим зависимость значения текущей распорной силы от коэффициента  $n$ :

$$F_{p,i} = F_p \left( 1 - n \frac{f_{п.и.и.}}{f_i} \right), \quad (3)$$

где  $f_{п.и.и.}$  — приведенный минимальный коэффициент трения:

$$f_{п.и.и.} = \frac{f_{\min}}{1 + zC_{\min}f_{\min}}.$$

Для "идеальной" АФМ аналогичная зависимость имеет следующий вид [9]:

$$F'_{p,i} = F_p \left( 1 - \frac{f_{п.и.и.}}{f_i} \right). \quad (4)$$

Сопоставление зависимостей (3) и (4) показывает, что для повышения номинальной нагрузочной способности АФМ, согласно поставленной задаче, значение распорной силы  $F_{p,i}$  должно быть уменьшено в соответствии с соотношением (3).



Очевидно, что чем больше значение коэффициента  $n$ , тем меньшим будет каждое текущее значение распорной силы. Условием автоматического регулирования предельного вращающего момента любой принципиальной схемы АФМ является действие распорной силы УУ обратной связи, поэтому из соотношения (3) вытекает ограничение максимального значения коэффициента  $n$ :

$$n < \frac{f_i}{f_{п.мин}}. \quad (5)$$

В неравенстве (5) вместо параметра  $f_i$  необходимо принять параметр  $f_{мин}$ , поскольку любое другое значение коэффициента трения дает более высокий коэффициент  $n$ , который при определенных текущих значениях коэффициента трения обращает распорную силу в ноль.

В реальности это не означает возможности отсутствия распорной силы, что исключается принципом действия УУ обратной связи АФМ, а лишь указывает на необходимость учитывать данное обстоятельство теоретически для получения "идеальной" нагрузочной характеристики АФМ [1].

Учитывая представление параметра  $f_{п.мин}$ , запишем соотношение (5) в следующем виде:

$$n < 1 + zC_{мин}f_{мин}. \quad (6)$$

Номинальная нагрузочная способность исследуемой АФМ, согласно соотношению (2), изменяется пропорционально коэффициенту  $n$ , поэтому целесообразно увеличивать его значение.

Из соотношения (6) следует, что значение коэффициента  $n$  может быть повышено с увеличением числа пар трения фрикционной группы и (или) минимального КУ обратной связи.

Однако увеличение КУ обратной связи, в основном за счет угла  $\alpha_{мин}$ , приводит к росту распорной силы, что, в свою очередь, влечет за собой уменьшение номинальной нагрузочной способности муфты. В связи с этим единственным реальным способом увеличения коэффициента  $n$  является увеличение числа пар поверхностей трения фрикционной группы.

### Реализация способа повышения номинальной нагрузочной способности АФМ

Если соблюдать принцип достижения "идеальной" нагрузочной характеристики модернизированного варианта АФМ, изложенный выше,

это приводит к низкому эффекту прироста номинального вращающего момента. Например, при  $z = 10$ ,  $f_{мин} = 0,1$ ,  $C_{мин} = 0,28$  увеличение вращающего момента  $T_H$  составляет 28 % [10].

Увеличение коэффициента  $n$  приводит к отклонению реальной зависимости изменения распорной силы от теоретической, отражаемой соотношением (3). Данное отклонение имеет место в тех случаях, когда, согласно соотношению (3), значение распорной силы становится равным нулю.

В данном случае значение коэффициента  $n$  может быть повышено до значения, вычисляемого по формуле

$$n = \frac{f_k}{f_{п.мин}},$$

где  $f_k$  — коэффициент трения, выше которого распорная сила не обращается в ноль.

В случае последних рассуждений справедливо приведенное выше замечание, касающееся относительности обращения в ноль распорной силы УУ обратной связи.

Поскольку при уменьшении угла  $\alpha_i$  и, в частности, угла  $\alpha_{мин}$ , распорная сила не обращается в ноль, оценим влияние на точность срабатывания АФМ отклонения теоретической закономерности изменения силы  $F_{p,i}$  от реальной, связанной с указанным обстоятельством.

Для определения действительного значения перегрузки и коэффициента точности АФМ с повышенной номинальной нагрузочной способностью ( $n > 1$ ) и зависимостью распорной силы от текущего коэффициента трения согласно соотношению (3) и ограничению значения коэффициента  $n$  в соответствии с неравенством (5) воспользуемся *следующей гипотезой*.

В АФМ с переменным КУ обратной связи при передаче номинального вращающего момента тела качения  $b$  (см. рис. 1, а) занимают в гнездах такое положение, которое соответствует коэффициенту трения при предшествующем срабатывании муфты, если после этого не происходило последующее изменение коэффициента трения.

Данное положение тел качения соответствует также определенному углу давления  $\alpha_i$  и, следовательно, значению КУ  $C_i$  обратной связи. Для дальнейшего исследования необходимо устано-





вить функциональную зависимость КУ  $C_i$  от текущего значения коэффициента трения  $f_i$  при уменьшенных значениях угла давления, т.е. с учетом коэффициента  $n$ .

Поскольку исходным условием синтеза АФМ является постоянство предельного вращающего момента при ее срабатывании, запишем выражение для определения текущего вращающего момента муфты, учитывая структуру соотношения (2):

$$T_{п.i} = zF_n R_{cp} \frac{f_i}{1 + zC_i f_i}, \quad (7)$$

где  $C_i$  — текущее значение КУ в процессе автоматического регулирования.

Приравнявая друг к другу правые части соотношений (2) и (7), получаем зависимость текущего значения КУ обратной связи от текущего значения коэффициента трения, которая теоретически обеспечивает "идеальную" нагрузочную характеристику АФМ:

$$C_i = \frac{1}{n} \left( C_{\min} + \frac{1}{z f_{\min}} \right) - \frac{1}{z f_i}. \quad (8)$$

Зависимость (8) показывает, что КУ  $C_i$  возрастает по нелинейному закону при увеличении коэффициента трения  $f_i$ . С увеличением коэффициента  $n$  значение КУ  $C_i$  уменьшается, что соответствует приведенному выше утверждению.

"Стартовое" значение КУ  $C_{\min}$  также влияет на  $C_i$ , увеличивая его по мере своего роста.

Следуя принятой выше гипотезе, запишем соотношение для вычисления перегрузки при увеличившемся значении коэффициента трения:

$$T_{пер.i} = zF_n R_{cp} \frac{f_{i+1}}{1 + zC_i f_{i+1}}, \quad (9)$$

где  $f_{i+1}$  — увеличившееся значение коэффициента трения.

Соотношение (9) отражает тот факт, что в начальный период перегрузки относительное перемещение элементов УУ обратной связи отсутствует, и КУ  $C_i$  соответствует передаче муфтой нагрузки при предшествующем значении коэффициента трения.

Подставляя в соотношение (9) правую часть соотношения (8) и учитывая выражение (6) в форме равенства, получаем:

$$T_{пер.i} = zF_n R_{cp} \times \frac{f_{i+1}}{1 + \left[ (zC_{\min} + 1/f_{\min}) / (1 + zC_{\min} f_{\min}) - 1/f_i \right] f_{i+1}}. \quad (10)$$

График функции (10) построен на рис. 2 (кривая 1) по следующим исходным данным:  $z = 6$ ,  $F_n = 800$  Н,  $R_{cp} = 0,1$  м,  $C_{\min} = 0,4$ ,  $f_{\min} = 0,1$ . В формуле (6) принят понижающий коэффициент 0,8.

Поскольку срабатывание АФМ может происходить не только в тех случаях, когда предшествующее значение коэффициента трения равно его минимальному значению, но и при любом промежуточном значении, требуется проведение анализа функции (10).

Изучим характер данной функции в зависимости от изменения отношения  $f_{i+1}/f_i$ . Положим в целях упрощения, что  $f_i = f_{\min}$ . В этом случае можно считать изменение отношения  $f_{i+1}/f_{\min}$  максимальным при увеличении коэффициента трения  $f_{i+1}$ .

Разделим числитель и знаменатель формулы (10) на  $f_{\min}$  и введем следующее обозначение:

$$\Delta_i = \frac{f_{i+1}}{f_{\min}}.$$

Формула (10) представляет собой дробно-линейную функцию, характер которой хорошо изучен: функция нелинейно возрастает по мере увеличения аргумента. Следовательно, целесообразно исследовать количественную характеристику данной функции во всем интервале

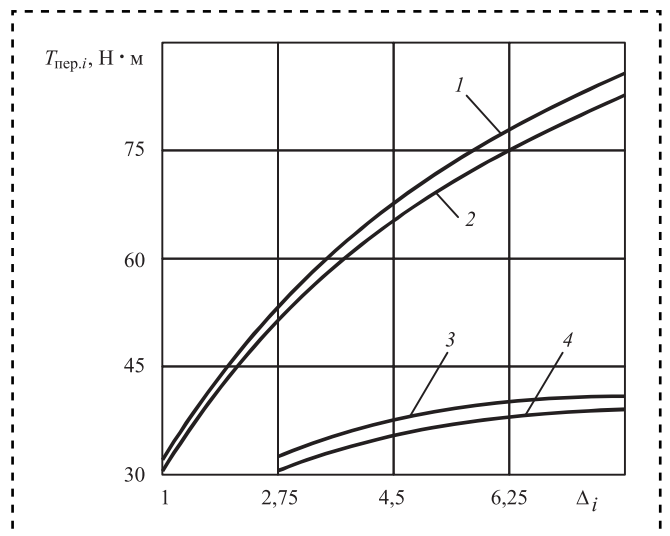


Рис. 2. Зависимости текущего вращающего момента от кратности изменения коэффициента трения при перегрузке АФМ

изменения значения коэффициента трения  $f_{\min} \dots f_{\max}$  (где  $f_{\max}$  — максимальный коэффициент трения).

Кривая 1 на рис. 2 показывает, что при изменении коэффициента трения в интервале  $0,1 \dots 0,8$  максимальное значение перегрузки, вносимой муфтой в привод машины при срабатывании, составляет примерно 2,67 при условии, что предыдущее значение коэффициента трения перед его увеличением равнялось его минимальному значению  $f_{\min}$ . Для сопоставления на рис. 2 кривой 2 представлена нагрузочная характеристика АФМ при  $n = 1$ , построенная по тем же исходным данным, что и кривая 1.

Анализ кривой 2 показывает следующее:

— номинальный вращающий момент АФМ в последнем случае меньше, чем в первом случае (кривая 1);

— перегрузка в последнем случае меньше (например, при  $f_{\max}$  перегрузка меньше в 1,2 раза).

Таким образом, предлагаемый вариант АФМ (при  $n > 1$ ) обладает повышенной номинальной нагрузочной способностью, однако, менее высокой точностью срабатывания.

Необходимо отметить, что приведенный выше случай, когда очередное срабатывание АФМ происходит при коэффициенте трения, изменившемся от минимального до максимального значения, весьма редкий в практике эксплуатации муфты. Чаще всего, срабатывание АФМ происходит при большем предыдущем значении коэффициента трения.

В связи с этим на рис. 2 приведены графики зависимости (10) при  $f_i = 0,275$  для исследуемого варианта АФМ (кривая 3) и для "идеальной" муфты с  $n = 1$  (кривая 4).

Сопоставление парных графиков (кривая 1 — кривая 3 и кривая 2 — кривая 4) показывает, что в обоих случаях второй вариант срабатывания АФМ приводит к большей стабилизации значения предельного вращающего момента. Например, при  $f_{\max}$  предельный вращающий момент для второго варианта срабатывания АФМ более чем в два раза меньше, чем при первом варианте.

По-прежнему точность срабатывания АФМ при  $n = 1$  выше, чем точность срабатывания исследуемого варианта муфты.

Результаты проведенного исследования справедливы только для резкоударного режима на-

гружения при перегрузках в приводе машины. В этом случае быстрое нарастание перегрузки не позволяет муфте мгновенно среагировать на внешнее воздействие, в результате чего элементы УУ обратной связи не успевают изменить свое взаимное положение, и муфта срабатывает при неизменном расположении тел качения в гнездах.

Изучение влияния режима плавного нагружения на эксплуатационные характеристики АФМ является объектом будущего исследования.

## Заключение

Результаты исследования показали, что максимальное увеличение номинальной нагрузочной способности АФМ с переменным КУ зависит от числа пар трения фрикционной группы, минимального КУ обратной связи и минимального значения коэффициента трения, с увеличением которых увеличивается кратность повышения номинальной нагрузочной способности муфты.

Наименьшей точностью срабатывания АФМ обладает в том случае, когда значение коэффициента трения, предшествующее срабатыванию муфты, минимальное, а значение коэффициента трения, соответствующее срабатыванию, максимальное.

Результаты исследования могут быть полезными для изучения картины изменения нагрузки внутри АФМ при наступлении перегрузки и разработки способа повышения точности срабатывания муфты с уменьшенным значением распорной силы УУ обратной связи.

## Выводы

Увеличение приведенного минимального коэффициента трения за счет уменьшения минимального значения угла давления тел качения УУ обратной связи АФМ с переменным КУ позволяет повысить ее номинальную нагрузочную способность.

Найдены зависимости распорной силы и КУ обратной связи от текущего коэффициента трения, при которых АФМ с переменным КУ обладает теоретически "идеальной" нагрузочной характеристикой.

Найдено ограничение максимального значения коэффициента кратности увеличения номинального вращающего момента АФМ с пере-



менным КУ в форме отношения минимального значения коэффициента трения к приведенному минимальному значению коэффициента трения, отражающее максимально возможное увеличение номинальной нагрузочной способности муфты.

Максимальное увеличение номинальной нагрузочной способности АФМ с переменным КУ зависит от числа пар трения фрикционной группы, минимального КУ обратной связи и минимального коэффициента трения, с увеличением которых увеличивается кратность повышения номинальной нагрузочной способности муфты.

Реальным способом увеличения коэффициента кратности повышения номинальной нагрузочной способности АФМ является увеличение числа пар трения фрикционной группы.

Для оценки точности срабатывания АФМ с переменным КУ при резкоударном характере нагружения принята рабочая гипотеза, заключающаяся в том, что срабатывание муфты происходит при неизменном относительном положении элементов УУ обратной связи.

Значение КУ обратной связи практически обратно пропорционально коэффициенту кратности повышения номинальной нагрузочной способности муфты.

При указанных условиях реальная точность срабатывания АФМ с переменным КУ и уменьшенной распорной силой несколько ниже точности срабатывания АФМ с увеличенной распорной силой.

Наименьшей точностью срабатывания АФМ с переменным КУ обратной связи обладает в том случае, когда значение коэффициента трения, предшествующее срабатыванию муфты, минимальное, а значение коэффициента тре-

ния, соответствующее срабатыванию, максимальное.

### Библиографический список

1. **Шишкарев М.П., Ву Тьен Зунг.** Практическая точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с переменным значением коэффициента усиления // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 3. С. 3—7.
2. **Шишкарев М.П.** Теоретические основы стабилизации выходного параметра адаптивного фрикционного контакта твердых тел // Известия вузов. Машиностроение. 2001. № 2—3. С. 17—23.
3. **Шишкарев М.П.** Комплексная оценка эксплуатационных характеристик адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 4. С. 29—30.
4. **Шишкарев М.П., Ву Тьен Зунг.** Работа адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 8. С. 38—42.
5. **Шишкарев М.П., Ву Тьен Зунг.** Настройка адаптивных фрикционных муфт с переменным коэффициентом усиления // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 3. С. 36—42.
6. **Шишкарев М.П., Ву Тьен Зунг.** Определение параметров адаптивных фрикционных муфт с одноконтурной отрицательной обратной связью // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 8. С. 32—36.
7. **Шишкарев М.П.** Улучшение эксплуатационных показателей адаптивных фрикционных муфт. Ростов н/Д.: ГОУ Рост. гос. акад. с.-х. машиностроения, 2008. 148 с.
8. **Шишкарев М.П.** Оптимальный способ настройки предохранительных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 3. С. 16—19.
9. **Шишкарев М.П., Чан Ван Дык.** Исследование вариантов адаптивных фрикционных муфт второго поколения // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 9. С. 42—45.
10. **Шишкарев М.П.** Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 2. С. 13—15.



П.А. Головкин, канд. техн. наук (АО "Плутон", Москва)  
E-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru

## Влияние термической обработки на стабилизацию размеров точных деталей из прецизионного сплава 29НК-ВИ

*Проанализированы особенности структуры горячекатаных прутков и влияние термической обработки на стабилизацию размеров точных деталей из прецизионного сплава 29НК-ВИ.*

*The features of the structure of hot-rolled bars and the effect of heat treatment on the size stabilization of precision parts made of the 29NK-VI precision alloy are analyzed.*

**Ключевые слова:** прецизионный сплав, горячекатаный пруток, разрыв скоростей деформации, стабильность структуры, опережение при прокатке, дефекты структуры, точность размеров, формоизменение, сохранение геометрии деталей.

**Keywords:** precision alloy, hot-rolled rod, deformation rate gap, structure stability, rolling advance, structure defects, dimensional accuracy, shape change, preservation of the geometry of parts.

Детали типа "вывод энергии" являются типовыми в конструкции широкой гаммы электровакуумных приборов СВЧ-диапазона, производимых АО "Плутон" [1, 2]. Общее требование к деталям таких изделий — их минимальное формоизменение в результате теплосмен при сборке-пайке, наладке и эксплуатации готовых изделий [1]. Нерасчетное изменение заданных точных размеров деталей может стать причиной ухода рабочих характеристик высокотехнологичного изделия (рис. 1).

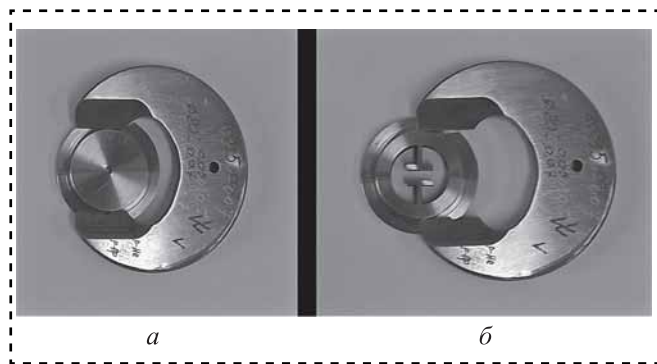


Рис. 1. Изменение контролируемого диаметра  $20_{-0.05}^{-0.07}$  мм детали до (а) и после (б) выреза в ней фигурного паза методом электроэрозионной обработки и скоба для контроля одного из размеров по схеме "проход/непроход"

В области изготовления электровакуумных СВЧ-устройств широко распространен обладающий комплексом специальных свойств прецизионный сплав вакуумной плавки 29НК-ВИ [3]. Действующие нормативные документы предусматривают изготовление горячекатаных прутков из этого сплава без последующего отжига [4]. В состоянии поставки макроструктура прутков не должна иметь усадочной раковины, рыхлости, расслоений, инородных включений и трещин [4], методика проверки должна соответствовать ГОСТ 10243—75 [5].

Методом Ш1 или Ш4 (ГОСТ 1778—70) контролируют загрязненность металла неметаллическими включениями и соответствие требованиям ГОСТ 5949—2018 в части отсутствия волосовин [6]. На столь широкий перечень контролируемых параметров не всегда обеспечивает соответствие поступающего материала требованиям производства электровакуумных СВЧ-приборов, так как при этом не контролируются размер зерна и уровень внутренних напряжений в материале прутка, как это предусмотрено, например, для прутков бронзы [7]. Этот факт и то, что физические и специальные свойства сплава гарантируются после прове-





дения регламентируемой ГОСТ 14080—78 термической обработки [8], вызывают противоречие с состоянием поставки металлического материала.

В отличие, например, от прессованных медных прутков, где вызванные процессом отставания наружных слоев выдавливаемой через матрицу заготовки, зоны разрыва скоростей деформации проявляют себя в виде характерных кольцевых и полукольцевых оттоков, для прутков сплава 29НК-ВИ зоны разрыва скоростей деформации в процессе их прокатки при визуальном анализе макроструктуры не обнаруживаются [9, 10]. Однако это явление существует и является одной из причин высокого уровня напряжений и появления микродефектов в материале прутков тем больше, чем больше их диаметр. Это обстоятельство является важным с точки зрения критических для разработки процесса изготовления детали "вывод энергии" условий, в то время как именно стабильность свойств и низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) и обусловили применение сплава в конструкциях СВЧ-приборов.

Рассматриваемую деталь "вывод энергии" изготавливают из горячекатаного прутка диаметром 30 мм. Контроль размеров механически обработанных заготовок показал, что их изменение в процессе вырезки фигурного паза на контролируемом диаметре  $20_{-0,07}^{-0,05}$  мм составил в среднем 0,015 мм (0,075 %). Для сравнения, принятые пределы упругости и текучести металлов и сплавов равны 0,05 % и 0,2 % соответственно [11]. Физически такое формоизменение равно ТКЛР сплава при нагреве от 20 до 200 °С, т.е. сравнимо с расчетным изменением размера детали в ее рабочем диапазоне температур [8]. Это значит, что изменение ответственного размера детали может существенно превысить расчетные показатели. Измерение твердости материала исходного прутка на поперечных и продольных образцах показало стабильные значения 221...225 НВ (209...214 НВ).

Исключением стала зона разрыва скоростей деформации, по аналогии с медными сплавами, расположенная приблизительно на расстоянии половины диаметра от оси симметрии прутка [9]. Здесь твердость снизилась приблизительно на 11...12 %, составив около 199 НВ. Исходя из известной корреляции между значениями твердости и прочности термически

не упрочненных металлических материалов, можно предположить, что даже без учета имеющихся место в этой зоне дефектов материала прутка, его прочностные показатели также заметно понизятся. А именно: воспользовавшись зависимостью между твердостью и прочностью для термически не упрочненных углеродистых сталей, определяем, что сопротивление текучести металлического материала снизилось с гарантируемых 540 до 400 МПа [8, 12].

Это значит, что определяемое по разнице твердости значение внутренних напряжений [12], вызванных явлением опережения при прокатке прутков, составляет не менее 140 МПа, или около 35 % предела текучести материала прутка. Такие расчетные показатели не противоречат гарантируемым значениям для отожженного материала по ГОСТ 14080—78, а значит, являются корректными.

Такое падение прочностных показателей не может не отразиться на поведении металлического материала в процессе его обработки, в том числе на стабильности получаемых размеров детали и его вакуумной плотности. Дефекты структуры материала заготовок деталей типа "вывод энергии" не только пагубно отражаются на прочности и специальных свойствах металлического материала, но и недопустимы с точки зрения обеспечения в готовом СВЧ-устройстве требуемой вакуумной плотности, которая должна обеспечиваться на протяжении не менее 15 лет (рис. 2) [1].

В структуре зоны разрыва скоростей деформации исходного прутка имеют место микроскопические расслоения и микронесплошности металлического материала у тройных стыков зерен [9]. Приведенные обстоятельства и цифры являются основанием для осуществления дополнительной термической обработки заготовок деталей.

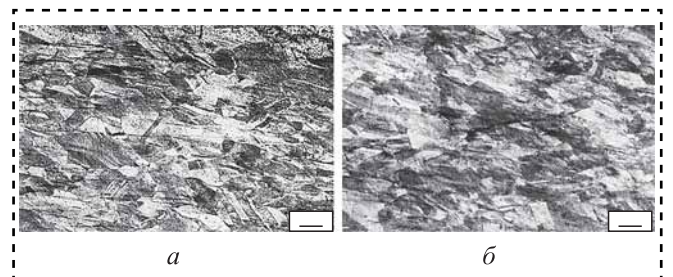


Рис. 2. Структура и дефекты материала прутка в зоне разрыва скоростей деформации в продольном (а) и поперечном (б) сечении прутка диаметром 30 мм,  $\times 100$



Предписанные ГОСТ 14080—78 режимы термической обработки деталей в вакуумных печах перед вырезом фигурного паза неизбежно изменят все выполненные и проверенные до этого размеры. Напротив, термическая обработка исходного прутка в атмосферной электрической печи существенно удешевит технологический процесс.

Предложен следующий режим стабилизирующего отжига прутковых заготовок из сплава НК29-ВИ: нагрев заготовок с печью до 900 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до температуры не более 60 °С, далее на воздухе.

Структуры материала прутка в долевом направлении до и после проведения отжига по предлагаемому режиму представлены на рис. 3.

Такая термическая обработка способствует гармонизации и получению ненаправленной структуры полуфабриката. Без учета зоны разрыва деформаций после отжига материал прутка показывает твердость 148...152 НВ (148...150 НВ). Конечно, такое понижение твердости ухудшает технологичность материала при его обработке резанием, заставляя корректировать режимы обработки, однако является платой за обеспечение заданной геометрической точности получаемых деталей и как следствие рабочих характеристик готовых приборов. Что же касается падения прочностных характеристик материала, оно неизбежно происходит в процессе сборки-пайки узла, в который входит деталь, и именно такие характеристики являются расчетными при проектировании изделия.

Для залечивания микроскопических расслоений и микропор в материале заготовок проведения одной только термической обработки недостаточно, и может быть рекомендована дополнительная деформационная проработка. В зависимости от конфигурации и размера заготовки: осадка с ковочного нагрева или другие приемыковки, повышающие однородность



Рис. 3. Структура материала прутка до (а) и после (б) отжига,  $\times 100$

и вакуумную плотность материала заготовок для изготовления деталей СВЧ-приборов [14].

На деталях типа колец, трубок или коронок, где часть материала, соответствующая зоне разрыва скоростей деформации, удаляется механически, дополнительную деформационную проработку можно не проводить, ограничившись рекомендованной в настоящем исследовании обработкой термической [15].

## Выводы

1. Существует противоречие требований к состоянию поставки и гарантируемым свойствам материала прутков из сплава 29НК-ВИ по ГОСТ 14082 и ГОСТ 14080, что важно с точки зрения обеспечения критических для изготовления точных деталей электровакуумных СВЧ-приборов свойств.

2. Изготовлению точных деталей из горячекатаных прутков в состоянии поставки препятствует высокий уровень внутренних напряжений, в частности, в прутке диаметром 30 мм уровень растягивающих напряжений достигает трети от гарантированного предела текучести сплава в соответствующем состоянии.

В результате формоизменения заготовок точных деталей их геометрические размеры изменяются настолько, что выводят их за пределы соответствующих допусков и изменяют характеристики готовых СВЧ-приборов.

3. Для обеспечения паспортных свойств материала сплава 29НК-ВИ целесообразно применять отжиг исходных прутков по режиму: нагрев заготовок с электрической печью до 900 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью до температуры не более 60 °С, далее на воздухе.

4. Для обеспечения необходимой вакуумной плотности СВЧ-приборов для ряда деталей может быть рекомендована дополнительная горячая деформационная проработка, призванная залечить имеющиеся место в зонах разрыва скоростей деформации микронесплошности и расслоения.

## Библиографический список

1. Самсонов Д.Е. Основы расчета и конструирования магнетронов. М.: Советское радио, 1974. 328 с.
2. Плутон. 90 лет. Гордимся прошлым, смотрим в будущее. М.: ООО "Пилотаж", 2019. 232 с.
3. ГОСТ 10994—74. Сплавы прецизионные. Марки. М.: Издательство стандартов, 2004. 18 с.



4. **ГОСТ 14082—78.** Прутки и листы из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 2004. 7 с.

5. **ГОСТ 10243—75.** Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры. М.: Издательство стандартов, 1985. 41 с.

6. **ГОСТ 5949—2018.** Металлопродукция из сталей нежелезистых и сплавов на железоникелевой основе коррозионно-стойких, жаростойких и жаропрочных. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. 35 с.

7. **ГОСТ 2060—2006.** Прутки латунные. Технические условия М.: Стандартинформ, 2008. 31 с.

8. **ГОСТ 14080—78.** Лента из прецизионных сплавов с заданным температурным коэффициентом линейного расширения. Технические условия. М.: Издательство стандартов, 2003. 17 с.

9. **Дзугутов М.Я.** Напряжения и разрывы при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1974. 280 с.

10. **ГОСТ 10988—2016.** Прутки из бескислородной меди для электровакуумной промышленности.

Технические условия М.: Стандартинформ, 2016. 14 с.

11. **Терминология** теории упругости, испытаний и механических свойств материалов и строительной механики // Сборники рекомендуемых терминов / под ред. акад. А.М. Терпигорева. Вып. 14. М.: Изд-во Акад. Наук СССР, 1952. 80 с.

12. **Дрозд М.С.** Определение механических свойств металла без разрушения. М.: Металлургия, 1964. 172 с.

13. **Материалы** в машиностроении: справочник в 5 т. / под общей ред. И.В. Кудрявцева. Т. 3. Специальные стали и сплавы. Выбор и применение / под ред. Ф.Ф. Химушина. М.: Машиностроение, 1968. 448 с.

14. **Головкин П.А.** Повышение качества деталей из бескислородной меди для электровакуумных приборов СВЧ-диапазона // Технология машиностроения. 2020. № 5. С. 34—41.

15. **Головкин П.А.** Особенности изготовления детали "коронка" из бронзы БрХ1 с учетом свойств ее исходного полуфабриката // Технология машиностроения. 2020. № 8. С. 39—41.



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.М. Колокатов**, канд. техн. наук

(Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева)

E-mail: akolokatov@mail.ru

## Рекомендации по выбору характеристик алмазных брусков при плосковершинном хонинговании гильз цилиндров ДВС

*Проведены исследования по выбору характеристик алмазных брусков для предварительного плосковершинного хонингования. Изучено влияние безалмазных брусков с дисульфидом молибдена при окончательном хонинговании гильз цилиндров ДВС на профиль плосковершинной поверхности.*

*Research has been carried out to select the characteristics of diamond bars for preliminary flat-topped honing. The effect of non-diamond bars with molybdenum disulfide during the final honing of the cylinder liners of the internal combustion engine on the profile of the flat-topped surface has been studied.*

**Ключевые слова:** хонингование, алмазные бруски, цилиндр, гильза.

**Keywords:** honing, diamond bars, cylinder, sleeve.

**В** машиностроении применяют процесс алмазного плосковершинного хонингования брусками с алмазами АС20, АРК4 и АРВ1 зернистостью 100/80...160/125.

Для исследования процесса алмазного плосковершинного хонингования использовали гильзы цилиндров двигателя ЗМЗ-511 из серого чугуна марки СЧ20 по ГОСТ 1412—85 твердостью 170...229 НВ и образцы, изготовленные из чугуновых заготовок, в качестве материала которых был выбран серый чугун СЧ20 (170...229 НВ) с химическим составом, аналогичным химическому составу гильзы цилиндра.

Исследования проведены на вертикально-хонинговальном станке модели ЗГ833. В качестве технологической оснастки применяли:

при хонинговании образцов — механическое приспособление для их жесткого крепления и хонинговальная головка диаметром 40 мм;

при хонинговании гильз цилиндров двигателя ЗМЗ-511 — приспособление диафрагменное и одношарнирные шестибрусковые хонголовки.

В качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) использована смесь из 85 % керосина (ГОСТ 33193—2014) и 15 % масла "Индустриальное-20" (И-20А) (ГОСТ 20799—88), а в заводских условиях — СОЖ, применяемая заводом. Перед началом экспериментов алмазные бруски прирабатывались согласно ГОСТ 25594—83.

Размеры образцов: внутренний диаметр 44,5 мм, длина 100 мм и толщина стенки 10 мм. Все образцы предварительно хонинговались под один размер и имели параметр шероховатости поверхности  $Ra = 0,25...0,20$  мкм. Режим обработки: окружная скорость 22 м/мин ( $n = 155$  мин<sup>-1</sup>), скорость возвратно-поступательного движения 8 м/мин, давление брусков 0,6 МПа.

Параметр шероховатости поверхности образцов измеряли профилографом-профилометром модели 252 завода "Калибр". Погрешность показаний прибора  $\pm 10$  %.

Эксплуатационные свойства сопряжений, работающих в условиях трения, зависят не только от шероховатости и высоты микронеровностей, но и от формы микрорельефа поверхности, которая сильно влияет на износостойкость и контактную жесткость деталей. Один из перспективных способов технологического воздействия на формирование микропрофиля гильзы двигателей — процесс плосковершинного алмазного хонингования, которое формирует на рабочей поверхности гильз микропрофиль, представляющий собой чередование глубоких впадин (рисок или масляных карманов) и плоских вершин (плато) [1].

Процесс плосковершинного хонингования состоит из двух операций: предварительного и окончательного хонингования. При предварительном хонинговании алмазными бруска-

ми на поверхности гильзы образуется исходный профиль, состоящий из впадин (рисок). На операции окончательного хонингования происходит срезание вершин исходного микропрофиля и образование площадок (плато), т.е. плосковершинного профиля (рис. 1).

Для предварительного хонингования рекомендованы бруски АРК4 125/100...100/80 100 МКЗ или АС15 125/100...100/80 100 МКЗ, а для окончательного хонингования — антифрикционные бруски М5-15 (АО "ВНИИАЛМАЗ"), в основу которых положена связка МКЗ, а алмазы заменены на антифрикционный наполнитель — дисульфид молибдена [1].

Способ изучения плосковершинного микропрофиля на поверхности гильз известен за рубежом как "платогорное" хонингование или plateau-honing, plateau-finich, plateau-honen.

В АО "ВНИИАЛМАЗ" в 1980 г. впервые были разработаны и изготовлены специальные хонинговальные бруски для окончательной обработки, в основу которых положена связка МКЗ, а алмазы заменены на антифрикционный наполнитель дисульфид молибдена [1]. В дальнейшем эти бруски обозначены как МК5-15 (молибденовые антифрикционные) и рекомендованы для окончательной обработки при плосковершинном хонинговании.

Микропрофиль после плосковершинного хонингования оказывает влияние не только на износостойкость гильз, но и на расход масла на угар. В связи с этим оптимальный микропрофиль после плосковершинного хонингования должен по крайней мере не вызывать увеличения угара по сравнению с профилем, получаемым обычным хонингованием.

Исходя из проведенного анализа литературных данных о процессах ремонта и изготовления

гильз цилиндров автотракторных двигателей намечено решить следующие основные задачи:

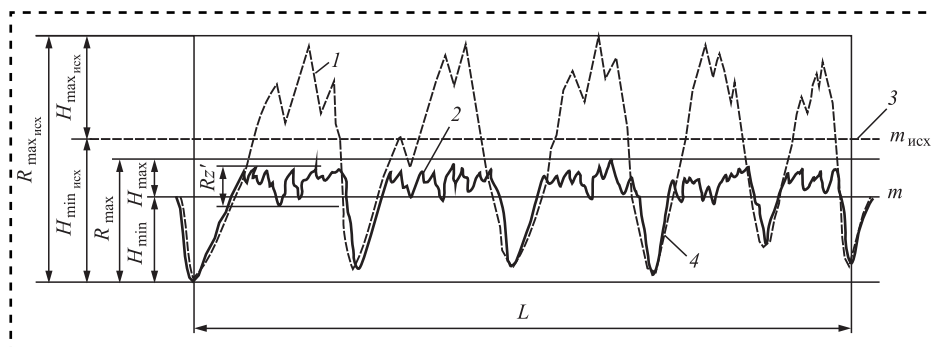
1. Подобрать характеристику алмазных хонинговальных брусков для плосковершинного хонингования на операциях предварительного и окончательного хонингования.

2. Разработать технические условия на качество поверхности гильз цилиндров ЗМЗ-511, обработанных методом плосковершинного хонингования.

Для определения параметров шероховатости плосковершинной поверхности (см. рис. 1) относительную опорную длину профиля  $tp$  определяли на девяти уровнях  $p$  через каждые 10 % от  $R_{max}$ . Значение  $R_{max}$  определяли как сумму величин  $H_{max}$  (расстояние от верхней точки профиля до средней линии) и  $H_{min}$  (расстояние от средней линии профиля до нижней точки профиля).

В целях обеспечения высокого экономического эффекта от внедрения плосковершинного хонингования на операции предварительного (получистового) хонингования взяты бруски АРВ1 зернистостью 100/80...200/160 на связке МК2 со 100%-ной концентрацией алмазов. В основном производстве для выполнения этой операции использовали бруски с алмазами АС20, которые по сравнению с алмазами АРВ1 в 5 раз дороже [1]. На операции окончательного хонингования исследовали три вида брусков: на эластичной связке Р11/Р9 (Р11 — связка, Р9 — подложка этой связки) — АС4 80/63 Р11/Р9 50 %, на металлокерамической связке МКЗ — АСМ 28/20 МКЗ 100 % и специальные бруски МК5-15.

На основании исследований и рекомендаций по плосковершинному хонингованию ряда организаций (АО "ВНИИАЛМАЗ", ИСМ НАНУ, КамАЗ и др.) принят для сырых гильз цилиндров



**Рис. 1. Профиль плосковершинной поверхности:**

1 — исходный профиль; 2 — плосковершинный профиль; 3 — средняя линия исходного профиля; 4 — масляные карманы

следующий микропрофиль: относительная опорная длина профиля  $tp = 50...70$  % на уровне сечения профиля  $p = 1,0...1,5$  мкм, средняя глубина масляных карманов (рисок) — 3...5 мкм и ширина — 20...60 мкм. Необходимо ввести еще одну характеристику микропрофиля — параметр шероховатости поверхности между рисками  $R_z'$  (см. рис. 1), значение которого должно приближаться к па-



раметру шероховатости, получаемому на ранних стадиях обкатки двигателя, и составлять  $R_z' = 0,8...0,4$  мкм.

При проведении экспериментов принят следующий режим обработки: окружная скорость 22 м/мин, скорость возвратно-поступательного движения 8 м/мин, давление брусков 0,7 МПа, время обработки на окончательном хонинговании — 5, 10, 15 и 30 с.

Результаты экспериментов на образцах, обработанных брусками APB1 100/80...200/160 МК2 100 % без окончательного хонингования, представлены на рис. 2, а. Величина  $tp$  на уровне  $p = 50$  % от  $R_{max}$  для зернистостей 125/100 и 160/125 больше, чем для зернистостей 100/80 и 200/160, а на уровнях  $p = 80...90$  % от  $R_{max}$  для всех зернистостей примерно одинакова и составляет 93...98 %. Учитывая, что  $tp$  для зернистости 200/160 с увеличением  $p$  нарастает значительно медленнее, чем у зернистостей 125/100 и 160/125, а также опыт исследования процесса плосковершинного хонингования, бруски с зернистостью 200/160 на операции предварительного хонингования использовать не рекомендуется из-за образования масляных карманов.

Исследование процесса плосковершинного хонингования образцов, обработанных на предварительном хонинговании брусками APB1 160/125 МК2 100 %, а на окончательном хонинговании брусками: АСМ 28/10 МК3 100 % и АС4 80/63 P11/P9 50 % представлены на рис. 2, б. Установлено, что с увеличением времени обработки с 5 до 15 с  $tp$  возрастает значительно быстрее при использовании брусков на связке МК3, чем на связке P11/P9. Так, при времени обработки 15 с  $tp$  на уровне сечения  $p = 1...1,5$  мкм составит для брусков на связке P11/P9 7...27 %, а для брусков на связке МК3 — 43...84 %, т.е. в 6,1—3,1 раза больше.

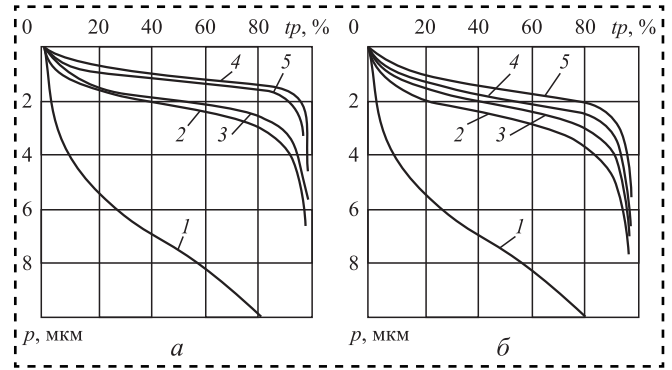


Рис. 2. Относительная опорная длина профиля образцов из чугуна СЧ25 (170...241 НВ), обработанных брусками APB1 160/125 МК2 100 % без окончательного хонингования (1) и при окончательном хонинговании брусками АСМ 28/10 МК3 100 % (а) и АСР 80/63 P11/P9 50 % (б) за время 5 с (2), 10 с (3), 15 с (4) и 30 с (5)

При изучении профилограмм установлено, что глубина рисок при времени обработки 10...15 с брусками на связке МК3 составляет 2...6 мкм, ширина рисок — 60...100 мкм, а на связке P11/P9 глубина рисок 3...7 мкм, ширина — 60...120 мкм. Такая ширина рисок не отвечает нашим требованиям к микропрофилю плосковершинной поверхности. Таким образом, на основании данных экспериментов использовать бруски APB1 160/125 МК2 100 % на операции предварительного плосковершинного хонингования не рекомендуется.

Исследовали процесс плосковершинного хонингования образцов, обработанных на предварительном хонинговании брусками APB1 125/100 МК2 100 %, а на окончательном хонинговании брусками на связках P11/P9, МК3 и МК5-15. С увеличением времени обработки с 5 до 15 с значение  $tp$  возрастает, причем значительно быстрее при использовании брусков на связке МК3 (рис. 3).

При времени обработки 10 с  $tp$  на уровне сечения  $p = 1...1,5$  мкм составляет для брусков:

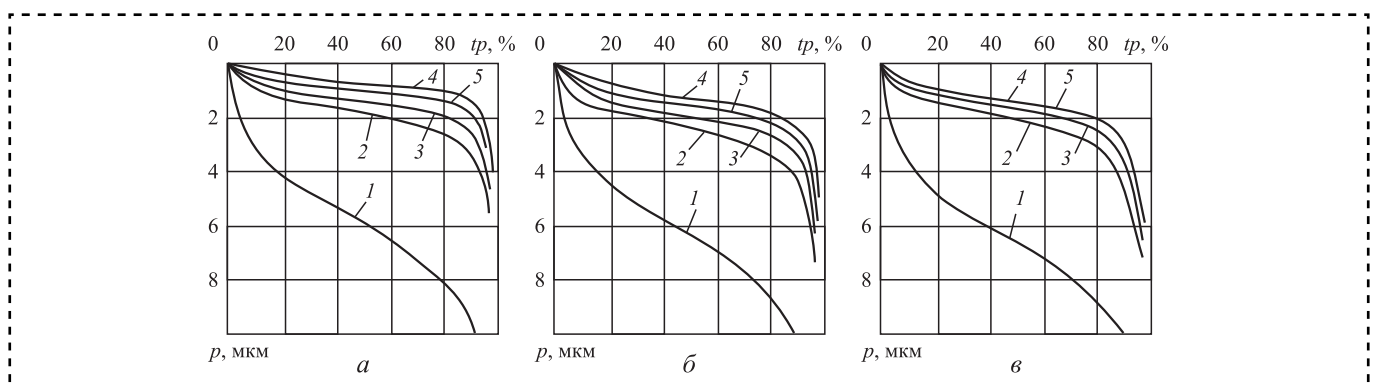


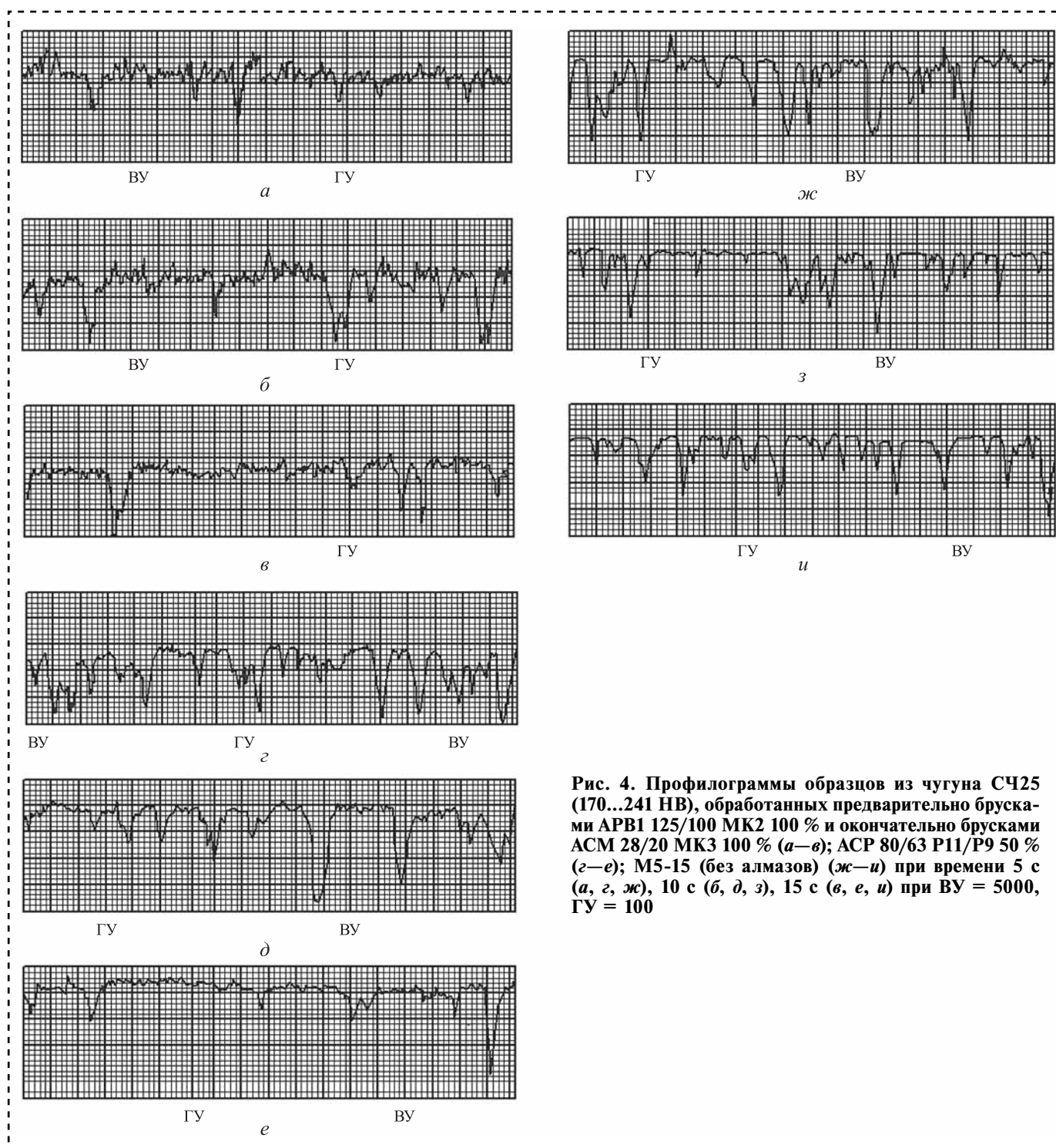
Рис. 3. Относительная опорная длина профиля образцов из чугуна СЧ25 (170...241 НВ), обработанных брусками APB1 125/100 МК2 100 % без окончательного хонингования (1) и при окончательном хонинговании брусками АСМ 28/20 МК3 100 % (а) и АСР 80/63 P11/P9 50 % (б) и брусками без алмазов МК5-15 (в) за время 5 с (2), 10 с (3), 15 с (4) и 30 с (5)



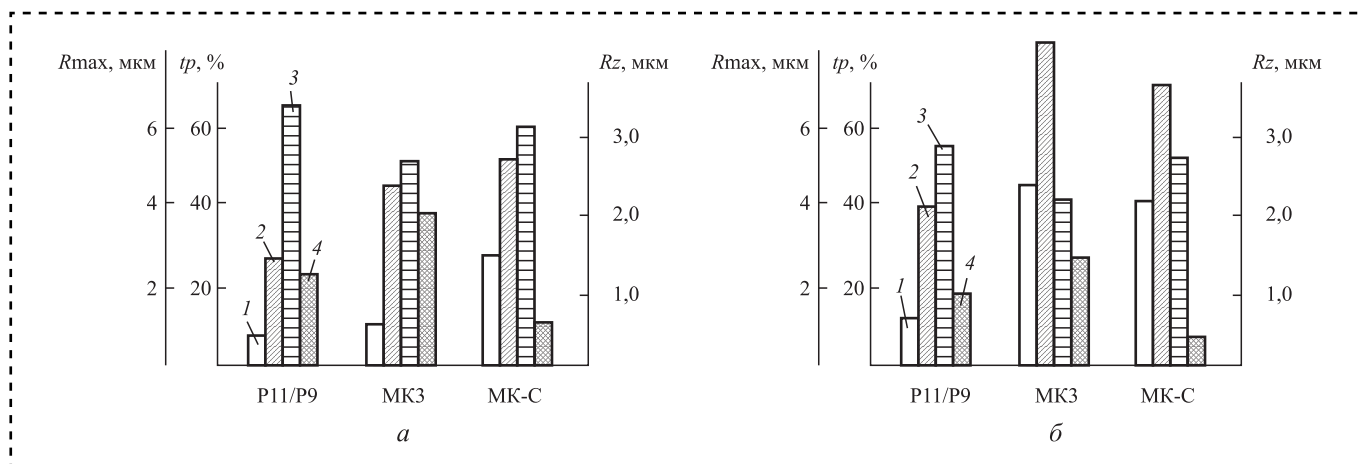


на связке P11/P9 — 7...28 %, на связке МК3 — 11...47 %, на связке МК5-15 — 29...54 %. При времени обработки 15 с  $tp$  на уровне сечения  $p = 1...1,5$  мкм составляет для брусков: на связке P11/P9 — 13...42 %, на связке МК5-15 — 38...68 %, на связке МК3 — 49...90 %. После обработки образцов (продолжительностью 15 с) брусками на связке МК3  $R_{\max} = 4,6$  мкм, а глубина рисок

достигает 4 мкм, после обработки брусками на связке МК5-15 —  $R_{\max} = 5,8$  мкм, глубина рисок до 5,2 мкм. Это объясняется тем, что бруски на связке МК3 обладают большей режущей способностью и снимают больший припуск, а бруски на связке МК5-15 вследствие отсутствия алмазов, не режут поверхность, а как бы сглаживают вершины микронеровностей, почти не снимая припуска.



**Рис. 4.** Профилограммы образцов из чугуна СЧ25 (170...241 НВ), обработанных предварительно брусками АРВ1 125/100 МК2 100 % и окончательно брусками АСМ 28/20 МК3 100 % (а–в); АСР 80/63 P11/P9 50 % (г–е); М5-15 (без алмазов) (ж–и) при времени 5 с (а, г, ж), 10 с (б, д, з), 15 с (в, е, и) при ВУ = 5000, ГУ = 100



**Рис. 5. Основные характеристики микропрофиля образцов, обработанных на предварительном хонинговании брусками АРВ1 125/100 МК2 100 % и на окончательном хонинговании брусками АСР 80/63 Р11/Р9, АСМ 28/20 МК3 100 % и брусками МК5-15 (МК-С) со временем 10 с (а) и 15 с (б):**

1 —  $tp$  при  $p = 1$  мкм; 2 —  $tp$  при  $p = 1,5$  мкм, 3 —  $R_{max}$ ; 4 —  $R_z$  между масляными карманами

Поэтому после обработки брусками на связке МК5-15 число рисок больше и их глубина колеблется от 1,5 до 5,2 мкм, а после связки МК3 — риск меньше и их глубина колеблется от 1,0 до 4,0 мкм. При времени обработки 30 с значение  $tp$  для брусков на связке Р11/Р9 возрастает, а для связки МК3 уменьшается благодаря ее повышенной режущей способности. Следовательно, значение  $tp = 50$  %, отвечающее нашим требованиям к микропрофилю, получается при времени обработки 10 с брусками на связке МК5-15, а при времени обработки 15 с брусками на связках МК3 и МК5-15.

Окончательный выбор оптимального времени обработки на операции окончательного хонингования сделан на основе анализа профилограмм (см. рис. 4). Параметр шероховатости между рисками с увеличением времени с 5 до 15 с уменьшается. Так, шероховатость поверхности между рисками  $R_z$  при времени обработки 10...15 с составляет: для брусков на связке МК3 — 1,5...2,0 мкм, на связке Р11/Р9 — 1,0...1,2 мкм, на связке МК5-15 — 0,4...0,6 мкм. Наилучшие результаты обеспечивает связка МК5-15. Шероховатость между рисками после обработки брусками на связке МК5-15 находится как бы на одной прямой и приближается по своему характеру к той поверхности, которая получается на зеркале гильзы на ранних стадиях обкатки двигателя. Следовательно, можно ожидать, что после обработки специальными брусками такая шероховатость будет облегчать процесс приработки гильз и цилиндров и будет

вызывать меньший приработочный износ гильз и поршневых колец.

Для выбора оптимальной характеристики брусков и оптимального времени на окончательном хонинговании построены диаграммы зависимостей основных характеристик микропрофиля от вида связки брусков и времени обработки (рис. 5), из которых следует, что микропрофиль, получаемый при обработке образцов брусками на связке МК5-15 (МК-С) и МК3 при времени 15 с, наиболее соответствует рекомендуемому микропрофилю, причем предпочтительнее использовать бруску на связке МК5-15, так как глубина масляных карманов больше на 1 мкм и класс чистоты поверхности между рисками увеличивается с 9а до 11а класса. Поэтому на операции предварительного плосковершинного хонингования рекомендованы бруски АРВ1 125/100 МК2 100 %.

### Заключение

В результате проведенных исследований на образцах из СЧ25 (170...241 НВ) установлено, что для получения плосковершинного профиля на операции предварительного хонингования можно использовать бруски АРВ1 125/100 МК2 100 %, а на операции окончательного хонингования — специальные бруски на связке МК5-15 и бруски АСМ 28/20 МК3 100 %. При этом предпочтительнее использовать бруску на связке МК5-15.



Микропрофиль поверхности гильз цилиндров двигателя ЗМЗ-511 (по нирезистивной вставке), обработанных на операции предварительного хонингования брусками АРВ1 125/100 МК2 100 %, а на операции окончательного хонингования брусками на связке МК5-15, с плосковершинным профилем оценивали по  $tp$ ,  $R_{max}$ ,  $Rz$ , глубине и ширине масляных карманов, а также сравнением снятых профилограмм с данными, полученными на образцах. Требуемый микропрофиль поверхности отверстия гильзы цилиндра ЗМЗ-511 получается при времени обработки 20 с.

Рекомендован технологический процесс восстановления гильз цилиндров двигателя ЗМЗ-511, в котором предусмотрено изменение характеристики брусков на операциях хонингования. На операции получистового (предварительного) хонингования рекомендованы бруски АРВ1 125/100 МК2 100 %, а на операции окончательного хонингования — специальные бруски без алмазов МК5-15.

В качестве технологической оснастки рекомендуется использовать одношарнирные шестибрусковые хонинговальные головки с удлиненными брусками АБХ 150×8×4×2 конструкции МГАУ и диафрагменное приспособление для крепления гильз. Режим обработки:  $v_0 = 30...45$  м/мин,  $v_{II} = 8...12$  м/мин, давление — 0,8 МПа (для получистового хонингования)

и 0,4 МПа (для окончательного хонингования), время окончательного хонингования — 0,3...0,4 мин.

Достоинством нового технологического процесса является то, что он не требует дополнительного оборудования и может осуществляться на вертикально-хонинговальных станках, заменяемых на заводах.

Новый технологический процесс производительнее заводского. Машинное время на операции получистового хонингования уменьшается с 2,0 до 1,0 мин, т.е. в 2 раза, а машинное время на операции окончательного хонингования — с 1,0 до 0,4 мин, т.е. в 2,5 раза. Штучное время хонингования одной гильзы снижается с 7,0 до 4,1 мин, т.е. в 1,7 раза [1].

Экономический эффект от внедрения процесса плосковершинного хонингования на заводе складывается из следующих составляющих; от снижения заводской себестоимости гильз, уменьшения времени стендовой обкатки двигателей и повышения ресурса двигателя.

#### Библиографический список

1. Колокатов А.М. Восстановление гильз цилиндров автотракторных двигателей алмазным обдирочным и плосковершинным хонингованием в условиях сельскохозяйственных ремонтных предприятий: дис. ... канд. техн. наук. М., 1982. 273 с.

## ЧИТАЙТЕ В СЛЕДУЮЩЕМ НОМЕРЕ:

**Розин А.Я.** Методы сборки корпусов катеров и обеспечение технологичности их конструкций

**Кравченко Е.Г., Алтухова В.В.** Повышение точности контроля параметров шероховатости упрочненных поверхностей деталей машиностроения

**Мигранов М.Ш., Мигранов А.М.** Исследование интенсивности износа режущего инструмента с адаптирующимися покрытиями

**Шишкарев М.П.** Оптимизация показателей модифицированной адаптивной фрикционной муфты второго поколения

**Безъязычный В.Ф., Истратов В.А., Елисеичев Е.А.** Обоснование выбора схватов многофункционального захватывающего устройства для автоматизации технологического процесса сборки микроприводов, используемых в биопротезировании верхних конечностей

**Пантюхина Е.В., Прейс В.В.** Математическая модель производительности бункерного загрузочного устройства с тангенциальными карманами и гребенкой

**Васин С.А., Евсеев А.В.** Проектирование конвейерных нонмиксеров



**В.П. Лапшин**, канд. техн. наук, **Н.А. Попов**, **В.Ю. Омелечко**

(Донской государственный технический университет)

E-mail: popov\_nikita\_2016@mail.ru, lapshin1917@yandex.ru, valomel23@mail.ru

## Вопросы вибродиагностики процессов резания на металлообрабатывающих станках

*Проанализирована вибрационная активность инструмента при резании металлов. Выявлены основные причины, вызывающие вибрационные колебания инструмента, в качестве которых выступают регенеративные колебания, тепловые колебания и другие виды вибраций. Оценена вибрационная активность инструмента на современном передовом оборудовании с точки зрения формируемых сил, препятствующих формообразующим движениям инструмента.*

*The vibration activity of the tool when cutting metals is analyzed. The main causes of vibration vibrations of the instrument have been identified, which are regenerative vibrations, thermal vibrations and other types of vibrations. The vibration activity of the tool on modern advanced equipment has been estimated from the point of view of the forces generated that prevent the tool's formative movements.*

**Ключевые слова:** вибрации инструмента, сила резания, динамика процесса обработки.

**Keywords:** tool vibrations, cutting force, dynamics of the processing process.

### Введение

Вибрации делят на две категории: первичную и вторичную. Первичные вибрации вызваны самим процессом резания (т.е. трением между инструментом и заготовкой, термомеханическим воздействием на образование стружки или сопряжением режимов), вторичные вибрации — регенерацией волнистости поверхности детали от предыдущих шагов при обработке. В англоязычной литературе считается, что регенеративный эффект является важнейшей причиной вибраций. Однако есть еще и термомеханическая вибрация, которая возникает из-за температуры и скорости деформации в очаге пластической деформации, также возникают вибрации в направлении осевой силы, связанные с упругодиссипативной природой суппорта с закрепленным в нем инструментом, которая создает вибрацию в направлении режущего усилия и наоборот [1–3]. Это приводит к одновременному возникновению вибрации в направлении резания и силы тяги. Регенеративная природа вибраций — наиболее распространенная форма самовозбуждающейся

вибрации. Она связана с резанием металлов по следу предыдущего резания, когда волнистая поверхность изделия, полученная при предыдущем этапе обработки, как бы генерирует новые колебания. Наиболее ярко этот эффект виден на примере фрезерования (рис. 1).

При фрезеровании соседнего зуба в разрезе эта волнистая поверхность атакует и образует новую волнистую поверхность. Толщина стружки и, следовательно, сила на режущем инструменте изменяются из-за разницы фаз между волной, оставленной предыдущими зубьями (при вращении — это поверхность, оставленная после предыдущего оборота), и волной, оставленной текущими. Это явление может значительно усиливать колебания, становиться доминирующим и накапливать вибрационный эффект [4]. На рис. 2 показано влияние разницы фаз при резании на толщину стружки [2]. Если относительная разница фаз равна нулю, то динамическая толщина срезаемого слоя также равна нулю (рис. 2, а). Если относительная разница фаз равна половине периода, то динамическое изменение толщины срезаемого слоя будет максимальным (рис. 2, в). Следовательно,

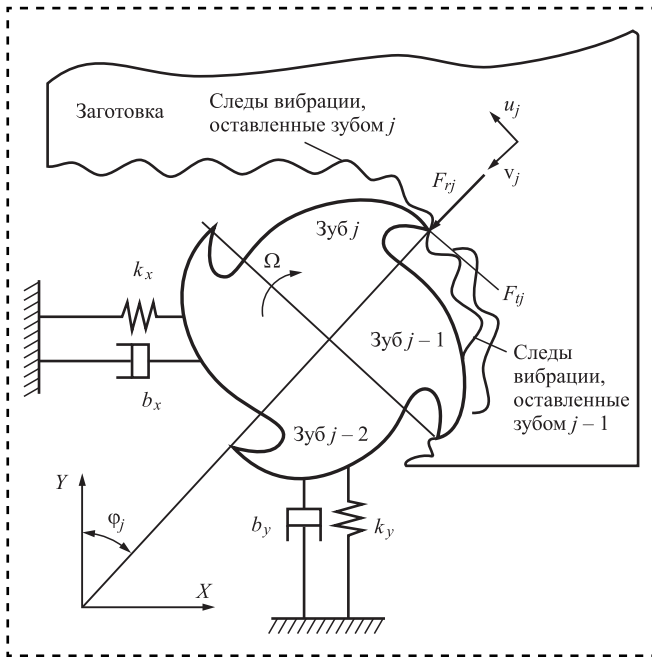


Рис. 1. Регенерация волнистости во фрезерной модели с двумя степенями свободы [16]

сила, формируемая при резании, зависит от совпадения или несовпадения колебаний инструмента при текущем резании с колебаниями инструмента на предыдущем шаге обработки.

Граница между стабильным разрезом (т.е. без вибраций) и нестабильным разрезом (т.е. с вибрациями) может быть визуализирована с точки зрения осевой глубины разреза в зависимости от скорости вращения шпинделя. Это диаграмма лепестков устойчивости — SLD (рис. 3).

На этих диаграммах можно найти специфическую комбинацию параметров обработки, которая приводит к максимальной устойчивости процесса [4]. Идея заключается в поиске областей стабильности внутри долей нахождения оптимального варианта в зависимости от выбранных критериев, таких как время, стоимость, выгода и точность.

В работе [5] предложен метод определения начала вибраций через измерение горизонтального отклонения заготовки в процессе обработки, метод регулирования скорости вращения шпинделя для контроля за возникновением регенеративных вибраций. Сигнал динамической силы резания собирается с помощью динамометра, и с помощью преобразований Фурье рассчитывается новая скорость шпинделя в целях нарушения механизма регенерации. Фрезерный звук, исходящий от механических колебаний, возникающих в зоне взаимодействия режущего инструмента с заготовкой, также используется для обнаружения дребезжания и контроля его возникновения [5–7]. Микрофон — наиболее удачный датчик для этой цели, в сравнении с другими датчиками, такими как динамометры, датчики смещения и акселерометры [5].

Обнаружение регенеративных вибраций в момент их возникновения, раннее определение биений позволяет избегать их возникновения [6]. Представленный метод может быть применен с использованием различных датчиков, но по практическим причинам используют акселерометры. Алгоритм обнаружения предложит контроллеру перейти в область обработки без регенеративных вибраций. В работе [7] предложен метод внутрипроизводственного мониторинга процессов образования стружки и вибрации при токарной обработке с использованием плотности спектра мощности (ПСД). В работе [8] разработана мультисенсорная система детектирования регенеративных вибраций для применения в промышленных условиях. Сравнили несколько датчиков, таких как вращающиеся динамометры, акселерометры, датчики акустической эмиссии и датчики электрической мощности, чтобы определить, какие сигналы наиболее чувствительны к возникновению дребезжания.

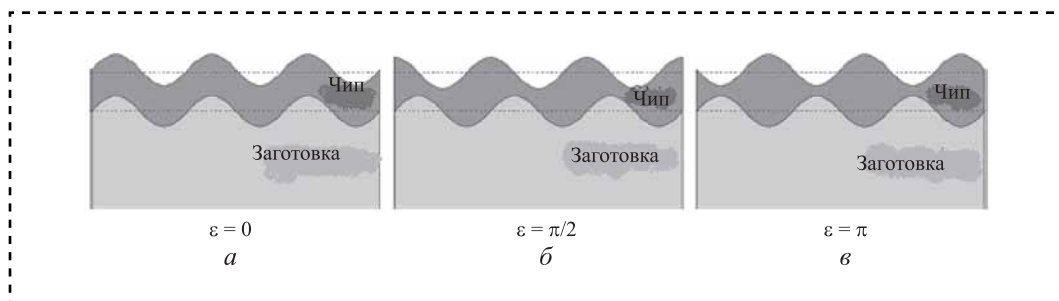


Рис. 2. Влияние фазы последующего прохождения зуба на толщину стружки [17]



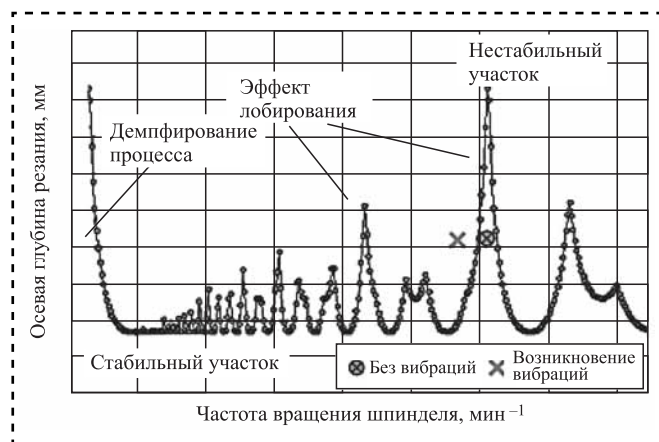


Рис. 3. Схема лепестков устойчивости

Компанией Suprock разработана недорогая беспроводная система датчиков вибрации для контроля регенерации колебаний фрезерных инструментов и предложен системный подход, позволяющий разработать и развернуть систему мониторинга в реальном времени на основе нескольких датчиков в процессе врезного шлифования, используя различные датчики для измерения акустической эмиссии, мощности шпинделя и вибрационных сигналов заготовки [8, 9]. Метод мониторинга и прогнозирования появления вибрации на основе анализа ремасштабированных диапазонов (P/C) обеспечивает статистическую оценку вариабельности временного ряда и экспериментально подтверждается сигналами ускорения [10]. Позднее были рассмотрены сигналы акселерометра для определения неустойчивости дребезга при различных условиях скорости шпинделя и соотношения глубины резания с помощью анализа детерминированных флуктуаций (DFA), адаптированного для частотно-временной области, для наблюдения за эволюцией динамики режущего инструмента. DFA имеет преимущество перед традиционным спектральным анализом: он может работать с нестационарными, нелинейными данными. Предложенный метод позволяет определить доминирование неустойчивости в колебаниях станка. Китайские исследователи в работе [11] предлагают гибридный подход к мониторингу регенеративных вибраций, основанный на скрытой Марковской модели (НММ) и искусственных нейронных сетях (ИНС). Скрытая модель Маркова позволяет моделировать во времени особенности, извлеченные из изменяющихся во времени сигналов, а искусственная нейронная сеть ин-

тегрирует входы. Оптическое устройство для измерения и регистрации вибраций в процессах фрезерования различает стабильную обработку резанием и обработку, в которой возникают вибрации [12].

Основной недостаток описанных выше технологий — они ждут появления проблемы, а затем принимаются меры, так что повреждение детали и компонентов станка, как правило, уже сделано. При черновой обработке это может и не быть проблемой, но при чистовой обработке это приводит к браку. Кроме этого, все дополнительное оборудование, существенно удорожает производство деталей на таких металлорежущих станках. Эти факторы делают прогностические аналитические решения более интересными для сравнения, хотя они также сталкиваются с некоторыми проблемами.

Одна из основных задач этого направления исследований — идентификация вибраций как можно быстрее, когда вибрации только начинаются, и предотвращение развития этих вибраций в целях уменьшения всех ее негативных последствий. Важно получать актуальные и полезные сигналы и находить эффективные алгоритмы их обработки. Однако внешние датчики (динамометры, акселерометры, датчики мощности и т.д.), обычно используемые для мониторинга процесса и идентификации дребезжания, должны быть размещены в конструкции машины, в неподвижном месте вблизи процесса, чтобы получить надежные сигналы и уменьшить рассеивание информации. Кроме того, алгоритмы обработки сигналов и распознавания диаграмм обычно работают параллельно в отдельном компьютере, а не на экране ЧПУ. Представляется, что решения должны быть более интегрированы в среду станка-оператора.

В силу своей сложности проблема вибраций инструмента до сих пор не решена полностью. Дальнейшие улучшения должны прийти с полным пониманием процесса образования вибраций. Для определения вибраций можно использовать не только процессы обработки на фрезерных станках, но также варианты резания на токарных станках.

#### Методика проведения эксперимента на токарном станке и полученные результаты

Для решения задачи оценки вибраций инструмента на силы резания проведена серия натуральных экспериментов на токарном станке

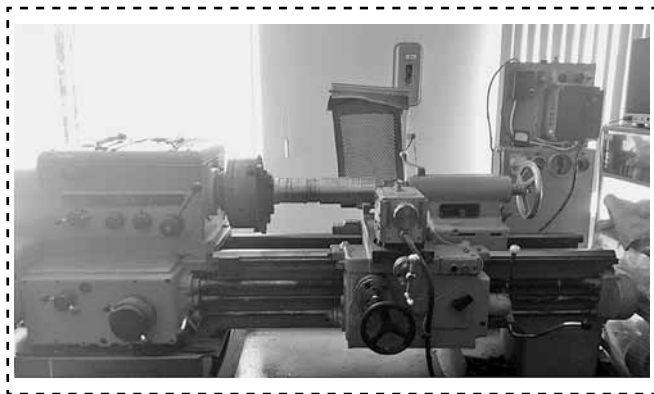


Рис. 4. Внешний вид экспериментальной установки

1К625, на котором установлен стенд для исследования режимов резания при токарной обработке STD.201-1 (рис. 4).

Стенд STD.201-1 предназначен для изучения динамических и тепловых процессов, протекающих при резании металлов на различных режимах в составе токарных станков. Интерфейсный блок STD.201-1 имеет модульную структуру и состоит из электронных блоков фирмы National Instruments. Электронные блоки установлены в шасси NI cDAQ-9174, которое подключено к ПК через USB2.0. В результате стенд позволяет измерять в широком частотном диапазоне, как вибрационные характеристики инструмента, так и составляющие силы резания по осям  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ .

В качестве инструмента на этапе подготовки к запланированному эксперименту использовали широко распространенный резец MP TNR 2020 K11, на котором установлена сменная пятигранная пластина 10113-110408 из твердого сплава T15K6. Использовали неизношенную пластину и пластину, имеющую по одной из граней износ, близкий к критическому. После проведения эксперимента степень износа превысила допустимую и составила 0,8 мм (рис. 5).

Обработанные в MatLab результаты эксперимента по токарной обработке на станке 1К625 с установленным на нем стендом STD.201-1, в виде зависимостей, составляющих силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ , для случая неизношенного инструмента приведены на рис. 6. В качестве обрабатываемой детали использовали круглый прокат из стали 45 диаметром 50 мм, частота вращения шпинделя составила  $810 \text{ мин}^{-1}$ , глубина резания 1 мм, подача — 0,11 мм/об.

Процесс обработки проходит с некоторой вибрационной составляющей, при этом усред-

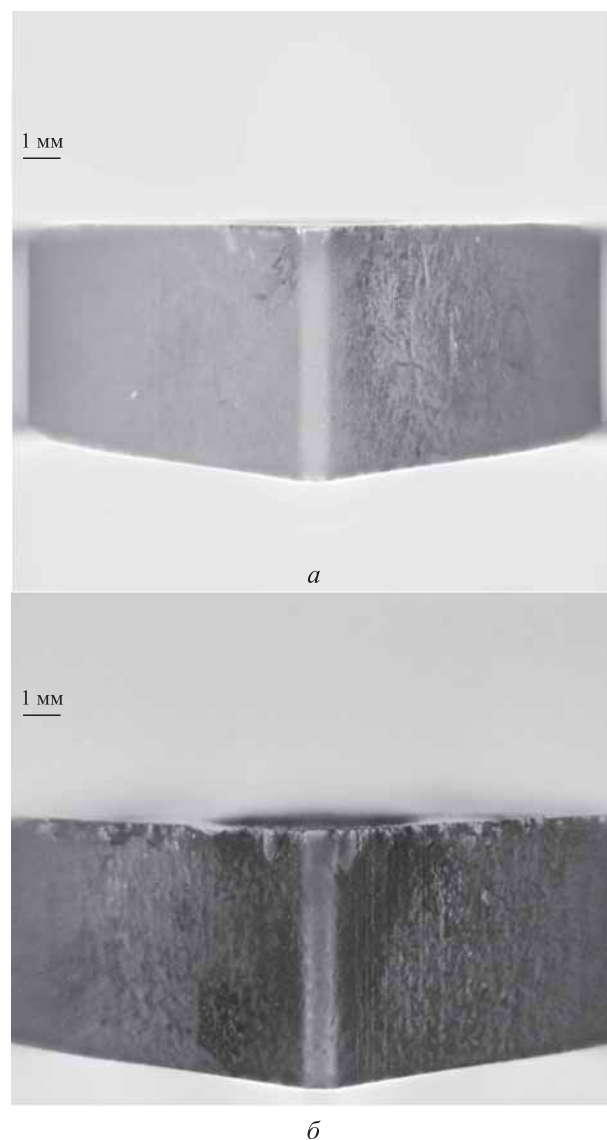


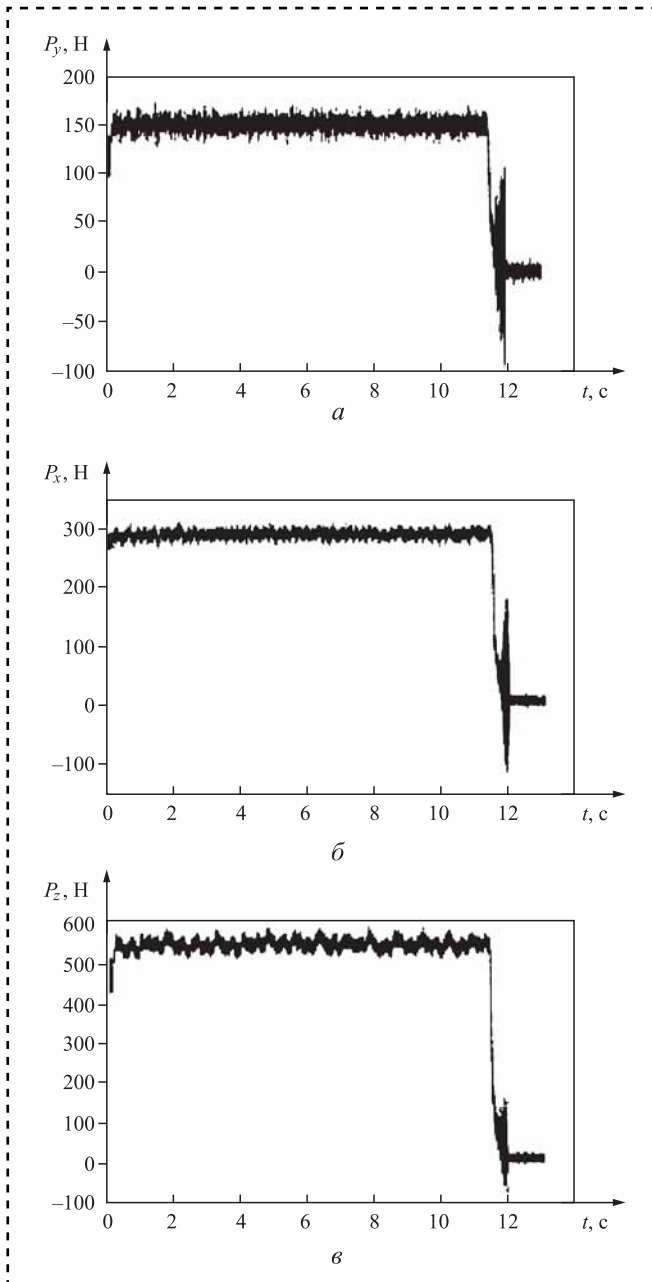
Рис. 5. Фотографии использованного инструмента: а — пластина не изношена; б — пластина изношена

ненные за период со 2-й по 6-ю с обработки, значения сил составили  $P_y = 150 \text{ Н}$ ,  $P_x = 290 \text{ Н}$ ,  $P_z = 540 \text{ Н}$  или в соотношениях:

$$P_y/P_x/P_z = 0,28/0,54/1. \quad (1)$$

Зависимости, составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  для случая инструмента с износом, близким к критическому, приведены на рис. 7.

Как видно из рис. 7 в сравнении с результатами, представленными на рис. 6, в целом составляющие силы резания выросли, за исключением  $P_y$ . Это связано с тем, что работа с изношенным инструментом приводит к существенному росту амплитуды вибраций вдоль



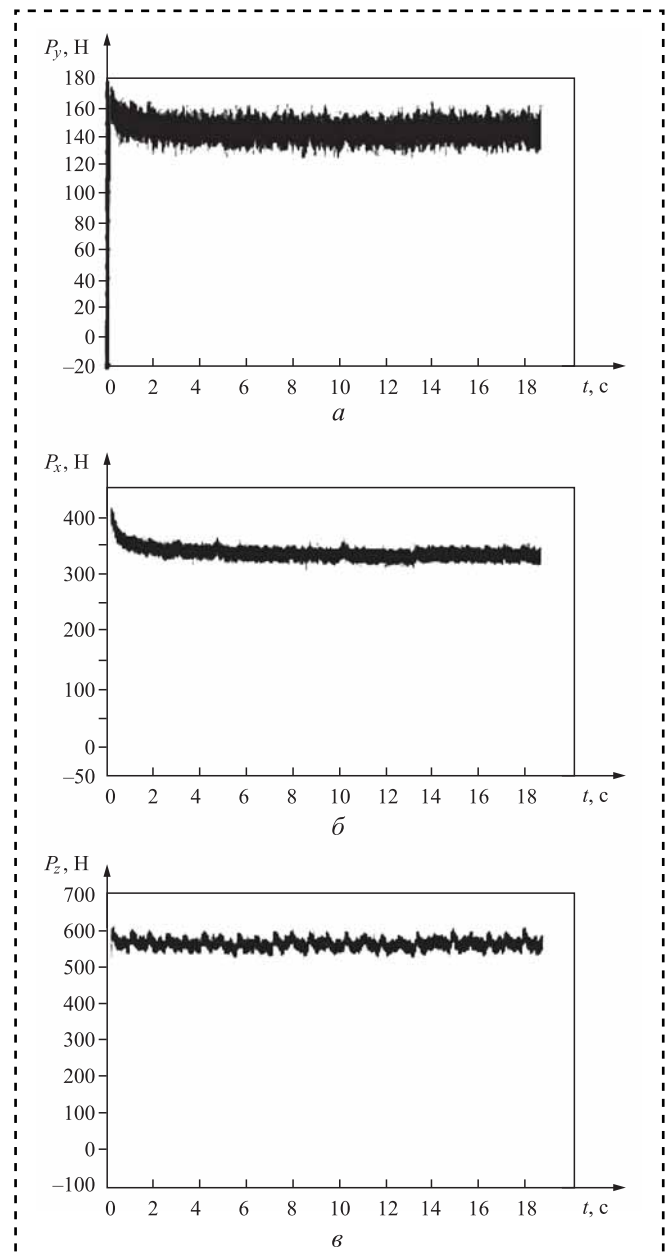
**Рис. 6.** Составляющие силы резания неизношенным инструментом

этой оси и к падению температуры в зоне контакта, в представляемом случае более чем на  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что в свою очередь уменьшило температурное расширение материала обрабатываемой детали и, как следствие, силу  $P_y$ . Наибольший рост наблюдается у составляющей  $P_x$ , это объясняется существенным ростом площадки трения, образующейся при износе инструмента по задней грани. Здесь играет роль фактор увеличения числа пятен контакта инструмента и обрабатываемой детали, что при интегрирова-

нии по возросшей площади контакта приведет к увеличению силы трения в этом направлении [13]. Соотношение между усредненными за тот же период, что и выше, составляющими сил резания следующее:

$$P_y/P_x/P_z = 0,25/0,6/1. \quad (2)$$

Влияние составляющей  $P_x$  действительно значительно выросло. В дальнейшем был проведен еще один эксперимент по обработке инструментом, степень износа которого на тот



**Рис. 7.** Составляющие силовой реакции изношенным инструментом



момент была критическая, и получены следующие соотношения:

$$P_y/P_x/P_z = 0,27/0,62/1. \quad (3)$$

Из полученных соотношений видно, что рост влияния осевой составляющей  $P_x$  продолжился и достиг значения 0,62 от значения тангенциальной составляющей силы резания.

### Выводы

Износ инструмента по задней грани существенно влияет на перестройку составляющих силы резания. Сам факт роста составляющей  $P_x$  не позволяет диагностировать степень изношенности лезвийного инструмента, так как обработка может проводиться с различными глубинами и скоростями резания, что будет приводить к изменениям  $P_x$  и без износа. Однако рост этой составляющей относительно остальных в соотношениях типа (2)—(3) уже позволит оценить возрастание износа инструмента и оценить влияние вибраций на процесс обработки.

### Заключение

Представлен вариант оценки вибрационной активности инструмента при резании. Определено, что помимо общеизвестных факторов вибрационная активность инструмента определяется во многом степенью изношенности инструмента, которая в свою очередь приводит к перестройке силовой реакции системы резания на формообразующие движения инструмента, и именно это ведет к росту вибрационной активности. Исходя из этого, важным фактором, влияющим на качество обработки, является, помимо регенерации колебаний при резании по следу и термомеханических эффектов при обработке, износ инструмента по задней грани.

### Библиографический список

1. **Tobias S.A.** Vibraciones en Maquinas-Herramientas. Spain: URMO, 1961.
2. **Wiercigroch M., Krivtsov A.M.** Frictional chatter in orthogonal metal cutting, Philosophical Transactions: Mathematical // Physical and Engineering Sciences (Series A). 2001. Vol. 359. Iss. 1781. P. 713—738.
3. **Tlusty J., Polacek M.** The stability of machine tools against self-excited vibrations in machining // ASME International Research in Production Engineering. 1963. Vol. 1. Iss. 1. P. 465—474.
4. **Faassen R.P.H., van de Wouw N., Oosterling J.A.J., Nijmeijer H.** Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2003. Vol. 43 (14) P. 1437—1446.
5. **Liao Y.S., Young Y.C.** A new on-line spindle speed regulation strategy for chatter control // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 1996. Vol. 36 (5). P. 651—660.
6. **Online** detection of the onset and occurrence of machine tool chatter in the milling process / R.P.H. Faassen et al. Vancouver, British Columbia, Canada, 2006.
7. **Tangjitsitharoen S.** In-process monitoring and detection of chip formation and chatter for CNC turning // Journal of Materials Processing Technology. 2009. Vol. 209 (10). P. 4682—4688.
8. **Kuljanic E., Sortino M., Totis G.** Multisensor approaches for chatter detection in milling // Journal of Sound and Vibration. 2008. Vol. 312 (4-5). P. 672—693.
9. **Subrahmanya N., Shin Y.C.** Automated sensor selection and fusion for monitoring and diagnostics of plunge grinding // Journal of Manufacturing Science and Engineering Transactions of ASME. 2008. Vol. 130 (3). P. 0310141—03101411.
10. **Vela-Martínez L., Jáuregui-Correa J.C., Álvarez-Ramírez J.** Characterization of machining chattering dynamics: An R/S scaling analysis approach // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2009. Vol. 49 (11). P. 832—842.
11. **Zhang C., Yue X., Jiang Y., Zheng W.** A hybrid approach of ANN and HMM for cutting chatter monitoring // Advanced Materials Research. 2010. Vol. 97—101. P. 3225—3232.
12. **Eppel A., Enikov E.T., Inesperger T., Gabor S.** Feasibility study of optical detection of chatter vibration during milling // International Journal of Optomechatronics. 2010. Vol. 4. No. 2. P. 195—214.
13. **Lapshin V.P., Turkin I.A.** Modeling tractive effort torque of wheel in deformation movements of pneumatic tire wheel // Procedia Engineering. 2017. Vol. 206. P. 594—599.

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: [sborka@mashin.ru](mailto:sborka@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 11.05.2021. Подписано в печать 09.07.2021. Формат 60 × 88 1/8.

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

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

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





## К сведению авторов журнала «Сборка в машиностроении, приборостроении»

Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 12 страниц, напечатанных на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через полтора интервала 12-м кеглем.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

В редакцию представляется статья в электронном виде — файл (с расширением .doc или .pdf) с набором текста (шрифт Times New Roman) или распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа).

### Требования к оформлению статьи

#### 1. Обязательно должны быть представлены сведения об авторах:

- Ф.И.О.;
- ученая степень и звание (если есть);
- место работы;
- должность;
- адреса и телефоны (домашний и служебный), факс;
- E-mail.

*Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.*

#### 2. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

#### 3. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации <http://teacode.com/online/udc/>);
- авторы (с указанием ученой степени);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

*Ссылку на гранты необходимо обозначать звездочкой (\*) на первой странице.*

#### 4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

#### 5. После текста должен быть приведен список литературы, используемый при написании статьи.

Составляется список по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5—2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать пяти наименований. Допускается ссылка на литературу не ранее 2000 г. выпуска (при необходимости ссылку на более "старый" источник литературы приводят непосредственно в тексте).

#### 6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, .jpeg 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисуючную подпись. Подрисуючные подписи следует представлять отдельным списком. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков.

*Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст!*

#### Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении редакционного совета без предоставления рецензии.

**Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются**

**Плата за публикацию статей не взимается**