ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

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: 01.02.00 – МЕХАНИКА, 05.02.00 – МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ, 05.04.00 – ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ, 05.05.00 – ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

2019 Том 20 **4 (225)**

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Дубовик Е.А. Технологичность конструкции электромеханического двухстоечного стационарного подъемника 147

Современные технологии сборки

Иванов Ю.В. Обеспечение наибольшего быстродействия координатных систем технологических автоматов сборки электронных модулей в роботизированном комплексе ГАСК многономенклатурного производства 151

Кузнецова С.В. Экспериментальная установка для распознавания движений деталей в процессе сборки 161

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Новиков В.В., Осипов К.Н. Оценка технического состояния сложных технических систем методом равновесных состояний 166

Авцинов И.А., Битюков В.К., Суханова Н.В. К вопросу конструирования пневматических устройств для сортировки специфических штучных изделий 172

Болоев П.А., Друзьянова В.П., Петров Н.В., Григорьев С.И. Экспериментальный стенд для исследования энергетической установки с биогазовым ДВС 177

Трение и смазка в машинах и механизмах

Ахмедпашаев М.М., Ирзаев Г.Х., Ахмедпашаев М.У. Оценка технического ресурса типовых деталей трибосопряжений погружного насоса 182

Шехтман С.Р., Сухова Н.А., Мигранов М.Ш. Защита деталей авиационной техники от агрессивного воздействия 187

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — **84967**) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

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

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

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.

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

ТОМСК

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

ТУЛА

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

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2019

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: 01.02.00 — MECHANIC, 05.02.00 — MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE, 05.04.00 — POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING, 05.05.00 — TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MECHANICAL ENGINEERING

2019 Vol. 20 **4 (225)**

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Dubovik E.A. Manufacturability of the design of the electromechanical two-column stationary lift 147

Modern technologies in assembly

Ivanov Yu.V. Providing the highest speed of coordinate systems of technological machines assembly of electronic modules in robotic complex FAAC multiproduct production 151

Kuznecova S.V. The experimental device for recognition of the detail's movement at assembly process 161

Quality assurance. Testing. Monitoring

Novikov V.V., Osipov K.N. The estimation of the technical state of the complex machines by the method of equilibrium states 166

Avcinov I.A., Bityukov V.K., Sukhanova N.V. To the question of the design of pneumatic devices for sorting specific piece products 172

Boloev P.A., Druzyanova V.P., Petrov N.V., Grigoryev S.I. Experimental stand for the study of a power plant with a biogas internal combustion engine . . . 177

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Akhmedpashaev M.M., Irzaev G.Kh., Ahmedpashaev M.U. Estimation of a technical resource of typical details of tribo-conjugations of the submersible pump 182

Shekhtman S.R., Sukhova N.A., Migranov M.Sh. Protection of aviation technology details against aggressive exposure 187

Journal is distributed on subscription, whith 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.

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
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
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
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. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

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

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2019

УДК 656.13:05.22.10

Е.А. Дубовик *(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)*
E-mail: dubovik1982@list.ru

Технологичность конструкции электромеханического двухстоечного стационарного подъемника

Проведен кинематический расчет технологичности конструкции, который заключается в снижении грузоподъемности подъемника, что позволяет уменьшить высоту профиля балок подхвата и в итоге уменьшить минимальную высоту дорожного просвета автомобилей, заезжающих на обслуживание. Предложен качественный анализ выбора привода подъемного оборудования.

The paper proposes a kinematic calculation of the technological design, which is to reduce the lifting capacity of the lift, which allows to reduce the height of the profile of the girders and, as a result, to reduce the minimum height of the ground clearance of cars entering the service, which is especially important for foreign cars. Also it is offered to consideration the qualitative analysis of the choice of the drive of the lifting equipment.

Ключевые слова: автомобиль, привод, подъемное оборудование, подъемник.

Keywords: car, drive, lifting equipment, lift.

Техническая оснащенность предприятий автомобильного сервиса — один из критериев их конкурентоспособности. Ее уровень зависит от типов используемого оборудования, в том числе и подъемного, определяющего сроки и качество выполнения операций ТО и ТР.

Это оборудование может быть с электро-, гидро- и пневмоприводом (таблица); подвижным и стационарным; одно-, двух- и многостоечным. Подавляющее большинство выпускаемых подъемников — двухстоечные стационарные. Они обеспечивают большую устойчивость поднятого автомобиля, повышают безопасность и удобство выполнения работ исполнителем. Тем не менее передвижные подъемники также находят применение, поскольку не требуют выполнения монтажно-установочных работ на фундаменте, позволяют использовать их на любой ровной площадке, в том числе и вне помещений. После выполнения работ такие подъемники могут быть удалены с занимаемого ими места, которое потом используется для других работ или оборудования. Маневренность передвижных подъемников позволяет при необходимости изменить технологический маршрут ТО и ТР автомобилей, что нередко используется на малых СТОА или на малых производственных площадях [1].

Одностоечные подъемники тоже вполне применимы, так как обладают рядом несомненных достоинств (рисунок).

Технические характеристики

Грузоподъемность, кг	2000
Высота подъема, мм	1975
Время подъема (опускания), с	36
Минимальная высота подхвата, мм	125
Габаритная высота, мм	3000
Мощность электродвигателя, кВт	2,2
Электропитание:	
фазы	3
частота, Гц	50
напряжение, В	380

Такой подъемник дает большую, чем двухстоечный подъемник, свободу передвижения вокруг автомобиля, обеспечивает удобный доступ к его нижним частям, имеет электромеханический привод с одним двигателем и винтом. Автомобиль легко въезжает на такой подъемник. Для одностоечного подъемника не требуется специальный фундамент, он малошумный и дешевле двух- и многостоечного.

Преимущества и недостатки привода подъемного оборудования

Сравниваемый показатель	Тип привода подъемника		
	Электрический	Гидравлический	Пневматический
Возможность работы в области больших нагрузок	–	+	–
Возможность работы при больших скоростях подъема и опускания автомобиля	–	+	+
Возможность дистанционного управления	+	–	–
Способность запасать (аккумулировать) энергию	–	+	+
Стоимость	+	–	–
Массогабаритные размеры	+	–	–
Пожаро- и взрывобезопасность	–	+	–
Экологичность	–	–	+
Ремонтопригодность	+	–	–
Фиксация автомобиля в поднятом состоянии	+	–	–

Одностоечный электромеханический стационарный подъемник для обслуживания автомобилей в условиях ограниченного пространства

У одностоечного подъемника есть существенный недостаток: сила F (подъема) автомобиля прикладывается к одной стойке, вследствие чего ее делают довольно массивной, и стабилизация автомобиля на нем (в одной точке) всегда менее надежна, чем на двухстоечном подъемнике. Значит, ниже уровень безопасности работ. Поэтому предприятия автосервиса отдают предпочтение подъемникам двухстоечным.

Каждый из приводов действительно имеет свои преимущества и недостатки. Поэтому большинство малых СТОА оснащают подъемниками с электромеханическим приводом. Большие же СТОА, дилерские и технические центры, как правило, применяют подъемники с гидравлическим приводом.

Одному рабочему в реальных условиях малых СТОА приходится выполнять тяжелые работы по монтажу и демонтажу агрегатов автомобиля. Поэтому необходимы новые инструменты и приспособления для обслуживания и ремонта в целях снижения трудоемкости работ и возможной замены вспомогательного рабочего средствами механизации.

Процесс обновления и рационализации в этой области продолжается. Однако это не означает, что сегодня в распоряжении СТОА имеются во всех отношениях превосходные инструменты. К сожалению, разработчики инструментов до сих пор не поддерживают прямых связей с мастерскими, а руководствуются лишь коммерческими интересами.

В ходе улучшения технологичности конструкции электромеханического двухстоечного стационарного подъемника определим силы и моменты, возникающие в приводе при работе подъемника в целях подбора оптимального по энергопотреблению электродвигателя, а также проведем расчет силовых элементов подхватов.

Первый этап — подбор электродвигателя.

Определим крутящий момент, необходимый для вращения грузового винта при максимальной нагрузке [2]:

$$T_{в1} = T_{в2} = \frac{F_x \frac{d}{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho)}{\eta_{пк}}, \qquad (1)$$

где F_x — вертикальная осевая нагрузка на грузовой винт;

d — средний диаметр резьбы грузового винта;

ψ — угол подъема винтовой линии,

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\rho}{\pi d^2};$$

ρ — приведенный угол трения, для однозаходной резьбы $\rho = \operatorname{arctg}\dfrac{f}{\cos\gamma}$;

f — коэффициент трения;

γ — угол наклона рабочей грани витка резьбы;

$\eta_{пк}$ — КПД опорных подшипников качения.

Вертикальную осевую нагрузку представим в виде

$$F_x = F_{max} + G_к + 2F_{тр}, \quad (2)$$

где F_{max} — грузоподъемность одной стойки;

$G_к$ — масса каретки и подхватов подъемника;

$F_{тр}$ — сила трения в радиальных опорах колонны при подъеме.

Рассчитаем потребный крутящий момент электродвигателя по формуле

$$T = \frac{T_{в1} + \dfrac{T_{в2}}{\eta_{цп}}}{\eta_{рп}}, \quad (3)$$

где $\eta_{цп}$ — КПД цепной передачи;

$\eta_{рп}$ — КПД ременной передачи.

Определим частоту вращения грузового винта по формуле

$$n_1 = 60V\frac{1000}{P},$$

где V — скорость перемещения каретки;

P — шаг резьбы.

Частота вращения вала двигателя

$$n_2 = n_1 u,$$

где u — передаточное число ременной передачи.

Найдем потребную мощность электродвигателя:

$$N_{эд} = \frac{Tn_2}{9556}. \quad (4)$$

Согласно ГОСТ 19523—81 выбираем электродвигатель мощностью $N \geqslant N_{эд}$ с частотой вращения вала, близкой к n_2. Данным требованиям удовлетворяет асинхронный двигатель 4А100L6 мощностью $N = 2{,}2$ кВт с частотой вращения вала $n_{дв} = 950$ мин$^{-1}$.

Второй этап — расчет балки выдвижной [2].

Материал — сталь 45.

Рассчитаем сечение короба балки из условия прочности на изгиб

$$\sigma_и = \frac{M_и}{W} \leqslant [\sigma_и], \quad (5)$$

где $\sigma_и$ — предел прочности материала трубы на изгиб;

$M_и$ — изгибающий момент, действующий в сечении балки, $M_и = F_{max\,в}l$;

$F_{max\,в}$ — осевая нагрузка, действующая на винт;

l — расстояние от оси приложения нагрузки до наиболее нагруженного сечения;

W — осевой момент сопротивления сечения.

Предполагаем, что масса, приходящаяся на ведущую ось поднимаемого автомобиля, составляет 60 % от общей массы. Тогда осевую нагрузку принимаем из условия по формуле:

$$F_1 = \frac{F_{max}60\ \%}{2},$$

где F_{max} — грузоподъемность подъемника.

По справочнику принимаем сечение, которое имеет ближайшее большее значение $W = \dfrac{M_и}{[\sigma_и]}$.

Из таблиц сортамента выбираем трубу профильную квадратную по ГОСТ 8639—57.

Третий этап — расчет винта опорного [2].

Средний диаметр резьбы d_2 винта из условия на сжатие:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4F'_{max}}{\pi[\sigma_{сж}]}}, \quad (6)$$

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

По справочнику принимаем параметры резьбы грузового винта, средний диаметр которой имеет ближайшее большее значение к расчетному: тип — однозаходная; трапецеидальная (ГОСТ 9894—73); угол профиля 30°; угол наклона рабочей грани профиля γ, °; диаметр средний d_2, мм; диаметр наружный d, мм; шаг резьбы S, мм.

Четвертый этап — расчет гайки направляющей [2]. Материал — сталь 45.

Параметры резьбы гайки: диаметр наружный d, диаметр внутренний d'_1.

Определяем минимальное число витков, находящихся в зацеплении.

В предположении равномерного распределения нагрузки по виткам число витков гайки находим из условия прочности витков на срез:

$$\tau_{ср} = \frac{F'_{max}}{Z\pi d'_1 k_р} \leqslant [\tau_{ср}], \quad (7)$$

где $k_р$ — коэффициент полноты резьбы;

$[\tau_{ср}]$ — допускаемое напряжение среза материала витков гайки;

$$Z = \frac{F_{max}}{[\tau_{ср}]\pi d_1' k_р}.$$

Наружный диаметр гайки D определяем из условия прочности гайки на растяжение силой F_x:

$$\sigma = \frac{F'_{max} k}{\frac{\pi}{4}\left[D_1^2 - (d')^2\right]} \leqslant [\sigma_р],$$

где k — коэффициент, учитывающий скручивание гайки;

$[\sigma_р]$ — допускаемое напряжение на растяжение материала гайки;

$$D_1 = \sqrt{\frac{4F'_{max} k}{\pi[\sigma_р]} + (d')^2}.$$

Минимальная толщина стенки должна составлять не менее 5 мм. Тогда принимаем наружный диаметр гайки направляющей $D_1 = 30$ мм.

Высоту гайки принимаем равной высоте короба балки выдвижной — H, мм.

Пятый этап — расчет балки поворотной [2].

Материал — сталь 45.

Расчет сечения проводим из условия прочности на изгиб:

$$\sigma_и = \frac{M_и}{W} \leqslant [\sigma_и];$$

$$M_и = F_{max} l,$$

где l — расстояние от оси приложения нагрузки до наиболее нагруженного сечения трубчатой части балки.

По справочнику принимаем сечение, которое имеет ближайшее большее значение $W = \frac{M_и}{[\sigma_и]}$. Из таблиц сортамента выбираем трубу профильную прямоугольную по ГОСТ 8645—57.

Шестой этап — расчет оси [2].

Материал — сталь 45.

В оси изгибающий момент $M_и$ вызывает деформацию сдвига (среза) по двум плоскостям и деформацию смятия. Обычно сопротивление стали деформации сдвига ниже, чем среза. Поэтому последней пренебрегают и ось рассчитывают только на срез.

Из условия прочности на срез имеем:

$$\tau_{ср} = \frac{4F_{ср}}{\pi d^2} \leqslant [\tau_{ср}],$$

где $F_{ср}$ — сила среза, $F_{ср} = \frac{M_и}{e}$;

e — плечо максимального действия силы относительно осевой линии балки поворотной.

Диаметр оси:

$$d = \sqrt{\frac{4F_{ср}}{\pi[\tau_{ср}]}}.$$

Седьмой этап — расчет плиты опорной балки поворотной [2].

Материал — сталь 45.

В плите сила растяжения $F_р$, возникающая от действия изгибающего момента, вызывает деформацию растяжения.

Из условия прочности на растяжение имеем:

$$\sigma_р = \frac{F'_р}{S_{сеч}} \leqslant [\sigma_р],$$

где $F_р$ — сила растяжения;

$[\sigma_р]$ — предел прочности материала на растяжение;

$S_{сеч}$ — площадь поперечного сечения плиты в наиболее опасном сечении.

Наиболее опасным сечением плиты является сечение, проходящее через центр отверстия, предназначенного для установки поворотной оси. Сила растяжения, возникающая в данном сечении, равна силе среза оси $F_р = F_{ср}$:

$$S_{сеч} \geqslant \frac{F_р}{[\sigma_р]}. \quad (8)$$

Определяем толщину опорной плиты h:

$$h = \frac{S_{сеч}}{2a'}, \quad (9)$$

где a' — ширина плиты в опасном сечении, $a' = (a - d)/2$;

a — ширина плиты;

d — диаметр отверстия под ось.

Безотказность (поток отказов P) работы электромеханического подъемника и любого его элемента определяется законом нормального распределения и зависит от двух составляющих — интенсивности λ потока отказов и наработки t:

$$P = \exp^{(-\lambda t)}. \quad (10)$$

Библиографический список

1. **Сарбаев В.И., Селиванов С.С., Коноплев В.Н.** Механизация производственных процессов технического обслуживания и ремонта автомобилей. М.: МГИУ, 2003. 284 с.

2. **Андросов А.А., Спиченков В.В., Андрющенко Ю.Е.** Основы конструирования машин: учеб. пособие. Ростов н/Д.: ДГТУ, 1993. 152 с.

УДК 658.52.01

Ю.В. Иванов, *д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
Тел.: (495) 495-31-72

Обеспечение наибольшего быстродействия координатных систем технологических автоматов сборки электронных модулей в роботизированном комплексе ГАСК многономенклатурного производства

Для повышения эффективности роботизированных комплексов ГАСК сборки электронных модулей многономенклатурного производства рассмотрена методика проектирования и наладки координатных систем с быстродействующими следящими приводами с электрическими двигателями постоянного и переменного тока, гидравлическими цилиндрами и гидравлическими моторами. В результате исследований получены модели (линейные и нелинейные), а также структуры и параметры корректирующих устройств. В правильно спроектированных и настроенных координатных системах время переходного процесса составляет несколько миллисекунд.

To improve the efficiency of the FAAC robotic complexes of assembly of electronic modules of multinomenclature production the method of designing and setting up the coordinate systems with fast servo drives, with AC and DC electric motors, hydraulic cylinders and hydraulic motors is considered. As a result of researches models (the linear and nonlinear), and also structures and parameters of correcting devices are received. In correctly designed and tuned coordinate systems, time of transient phenomenon is some millisecond.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, системная оптимизация эффективность, комплексность, производительность.

Keywords: parameter optimization, system optimization, effectiveness, complexity, productivity.

Повышение эффективности роботизированных комплексов ГАСК сборки электронных модулей многономенклатурного производства требует реализации разных подходов, в том числе улучшения характеристик координатных систем сборочных технологических автоматов (автоматического технологического оборудования (АТО)), промышленных роботов (ПР), например, повышения быстродействия. Увеличение быстродействия их следящих приводов повышает производительность и эффективность работы в целом. Проектирование и настройка следящих приводов затруднены тем, что в них применяется энергия разной физической природы (электричество, гидравлика и электрогидравлика) и разного вида нелинейности. В условиях постоянно возрастающей плотности монтажа электронных компонентов на плате определяющую роль играет время переходного процесса.

Цель работы — получение координатной системы (КС) со следящим электрогидравлическим приводом с высоким быстродействием (рис. 1).

Задачи исследования: разработка цифровой модели КС, учет нелинейностей, определение времени переходного процесса, полосы пропускания при обеспечении устойчивости в линейной и нелинейной версиях системы.

Предмет исследования — цифровая модель КС.

В первой ступени 3-ступенчатого преобразователя (рис. 2) находится электрический преобразователь пропорционального действия; во второй — два сопла и заслонка; в третьей — золотник и втулка.

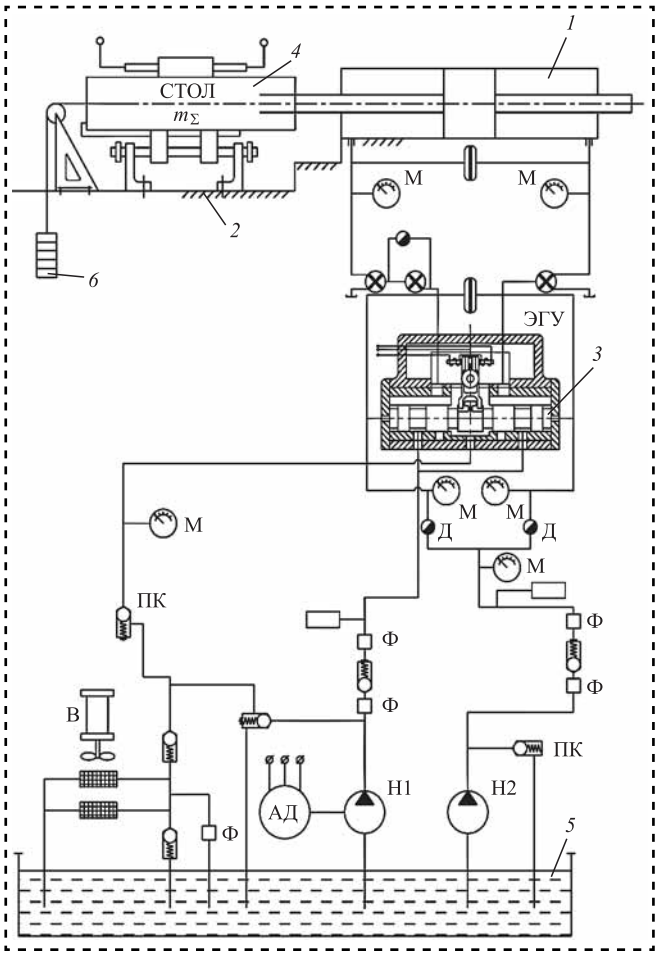


Рис. 1. Схема координатной системы с электрогидравлическим следящим приводом [1]:
1 — цилиндр недифференциальный двухстороннего действия; *2* — корпус; *3* — электрогидравлический трехступенчатый преобразователь; *4* — каретка координатной системы; *5* — корпус насосной станции; *6* — нагрузочный механизм; АД и Н1 — асинхронный двигатель и основной насос; Н2 — вспомогательный насос; ПК — клапан с переливным золотником; Ф — фильтр; В — вентилятор; М — манометр; Д — дроссель

На первом этапе проанализировали линейную модель КС, определили корректирующее звено, время переходного процесса и полосы пропускания, добротности по скорости.

На втором этапе рассматривали нелинейную модель КС с корректирующим звеном линейной модели. Определили структуру и параметры корректирующего звена (КЗ) нелинейной модели. Затем исследовали нелинейную модель с КЗ до достижения нужных динамических характеристик (времени переходного процесса, полосы пропускания, добротности по скорости).

При плотном монтаже электронных компонентов сильное влияние на производительность оказывает динамика следящего привода (СлПр) (время переходного процесса $T_п$ или время разгона $T_р$ и его полоса пропускания), поэтому $T_п$ необходимо уменьшать:

$$Q_ц = 1/(T_о + T_в);$$
$$T_в = 2T_р + L_\Sigma/N_{экэм}v_{кс} = 2T_п + L_\Sigma/N_{экэм}v_{кс},$$

где $Q_ц$ — цикловая производительность;
$T_о$ — основное время;
$T_в$ — вспомогательное время;
$T_р$, $T_п$ — время разгона и переходного процесса;
L_Σ — суммарный путь, проделанный КС при установке всех электронных компонентов;
$v_{кс}$ — номинальная скорость движения КС;
$N_{экэм}$ — число остановов КС.

Рассмотрим цифровую модель (ЦМ) КС со следящим приводом (СлПр).

Для линейной модели написаны и линеаризованы дифференциальные уравнения, разработана унифицированная модель и составлены передаточные функции КС с СлПр (рис. 3) [1]. Структура с гидроцилиндром (ГЦ) содержит блоки: *1*, *5*, *6*, *7*, *8*, *10*, *15*, *33*, *39* или *40*, еще возможны *2*, *3*, *4* (*1* — блок последовательно корректирующего устройства ПКУ; *5* — блок обратной связи по скорости; *6* — обратной связи по положению; *7* — электрической части электромеханического преобразователя (ЭМП) пропорционального действия; *8* — оригинального трехступенчатого электрогидравлического преобразователя (ЭГУ), в первой ступени которого механическая часть ЭМП, во второй — два сопла с заслонкой, в третьей — золотниковая цилиндрическая пара; *10* — гидравлической постоянной; *15*, *33* — блоки гидроцилиндра (ГЦ); *39* — генератор "ступенька"; *40* — генератор "синусоида"; *2* — регулятор скорости; *3* — регулятор контура второй производной; *4* — датчик обратной связи по второй производной).

Рассмотрим пример наладки ЦМ КС с СлПр сборочного АТО с ЧПУ.

Исходные данные: цифровая модель (см. рис. 3). Передаточные функции блоков модели (рис. 4):

$$W_1(S) = \frac{K_L}{T_L S + 1};\ W_2(S) = \frac{K_x}{T_x^2 S^2 + 2\xi_x T_x S + 1};$$
$$W_3(S) = \frac{K_{гп}}{S};\ W_4(S) = \frac{K_4}{S};\ W_5(S) = \frac{K_5}{S};$$
$$W_6(S) = 2\xi_ц T_ц = 0,92 \cdot 10^{-3};$$
$$T_L = 2,2 \cdot 10^{-4}\ с;\ K_x = 4,67 \cdot 10^{-4}\ с^{-1};$$
$$T_x = 6,93 \cdot 10^{-4}\ с;\ \xi_ц = \xi_x = 0,2;$$
$$K_{гп} = 139,8;\ K_L = K_5 = 1;\ P_н = 6,5\ МПа;$$
$$K_4 = 1/T_ц^2 = 1,89 \cdot 10^5.$$

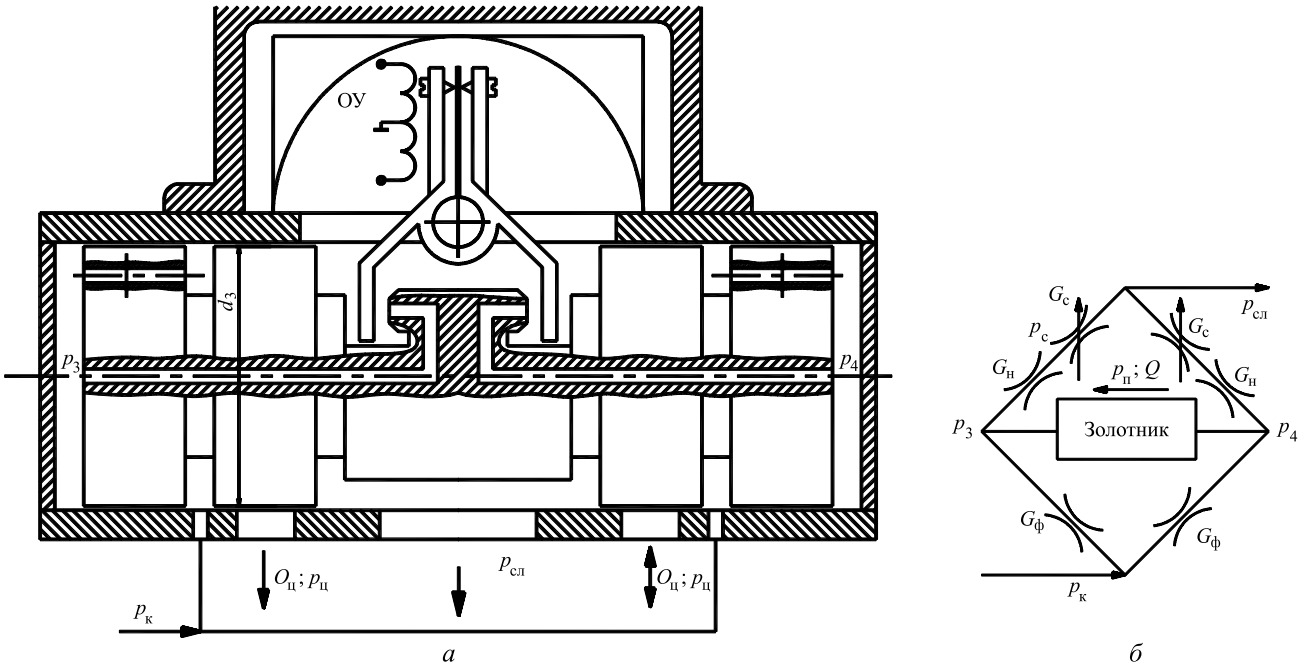


Рис. 2. Трехступенчатый электрогидравлический преобразователь (*а*) и его схема эквивалентного замещения (*б*): *G* — проводимость; *p* — давление; *Q* — расход

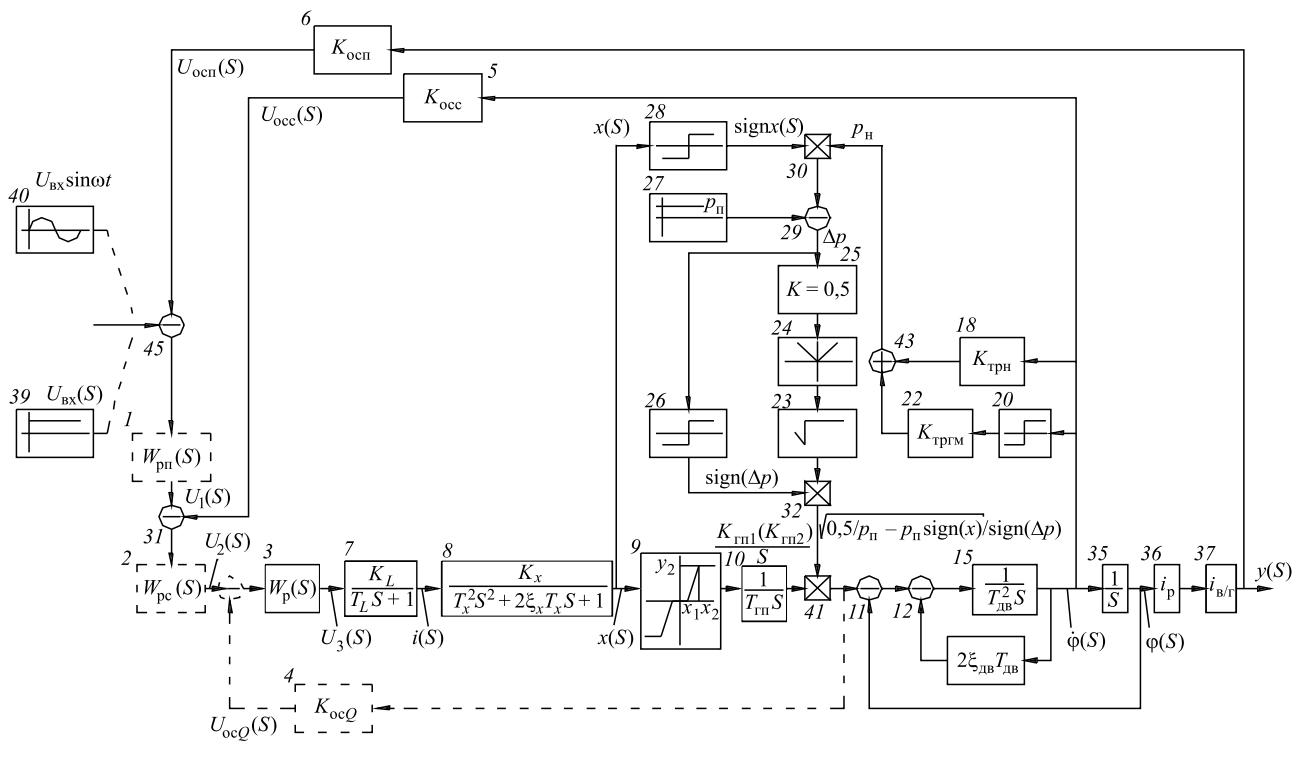


Рис. 3. Унифицированная модель координатной системы

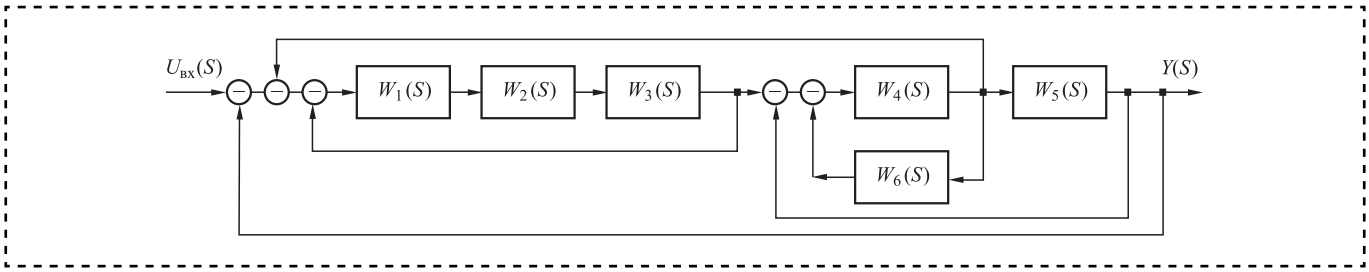
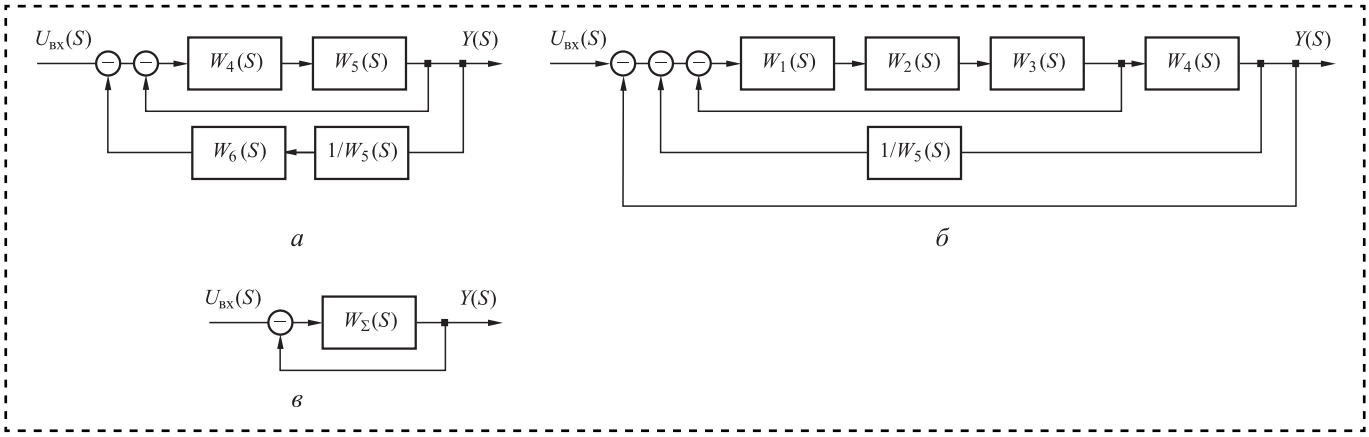


Рис. 4. Структурная схема неизменяемой части ЦМ КС с СлПр



а *б* *в*

Рис 5. Последовательность преобразования схемы КС с СлПр:
а, *б*, *в* — стадии процесса

Тогда (рис. 5):

$$W_\Sigma(S) = \frac{W_1(S)W_2(S)W_3(S)W_4(S)}{1 + W_1(S)W_2(S)W_3(S)W_4(S)\left[\frac{1}{W_{\Sigma 4}(S)} + \frac{1}{W_5(S)}\right]};$$

$$W_{\Sigma 4}(S) = \frac{W_4(S)W_5(S)}{1 + W_4(S)W_5(S) + W_4(S)W_6(S)}.$$

Подставим числовые значения исходных данных:

$$W_\Sigma(S) = \frac{12339,17}{1,05 \cdot 10^{-10}S^6 + 5,596 \cdot 10^{-7}S^5 + 6,11 \cdot 10^{-4}S^4 + 1,189S^3 + 267,91S^2 + 201350,5S + 12339,17}.$$

Преобразуем передаточную функцию $W_\Sigma(S)$. Освободимся от числителя и с помощью пакета программ MatLab или CC представим знаменатель в виде двух апериодических и двух колебательных звеньев:

Расчет параметров звеньев

Номер звена	Время T, с	Частота ω, $с^{-1}$	Логарифм частоты lgω	Коэффициент демпфирования ξ
1	16,32	0,06127	−1,213	—
2	$2,22 \cdot 10^{-3}$	450,45	2,65	0,186423667
3	$6,94 \cdot 10^{-4}$	1440,9221	3,1586	0,2023731097
4	$2,19 \cdot 10^{-4}$	4566,211	3,6596	—

Найдем сопрягающие частоты этих звеньев (таблица).

Замкнем систему обратной связью. Выполним исследование в режиме собственных колебаний (на единичное ступенчатое воздействие)

$$W_\Sigma(S) = \frac{1}{(16,32S + 1)(4,94 \cdot 10^{-6}S^2 + 8,29 \cdot 10^{-4}S + 1)(4,82 \cdot 10^{-7}S^2 + 2,81 \cdot 10^{-4}S + 1)(2,19 \cdot 10^{-4}S + 1)}.$$

и обеспечим устойчивость СлПр. Анализ переходного процесса нескорректированной линейной ЦМ СлПр КС АТО показал, что время $T_п$ значительно больше требуемого, а частота (полоса пропускания) $f_н \ll f_{треб}$, поэтому необходимо совершенствование коррекции СлПр.

Свернем блоки модели ЦМ неизменяемой части СлПр в одну $W_\Sigma(S)$

Построим (рис. 6) логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ): заданной неизменяемой части ЦМ СлПр КС АТО $L_{знч}(\omega)$, желаемой $L_ж(\omega)$ и корректирую-

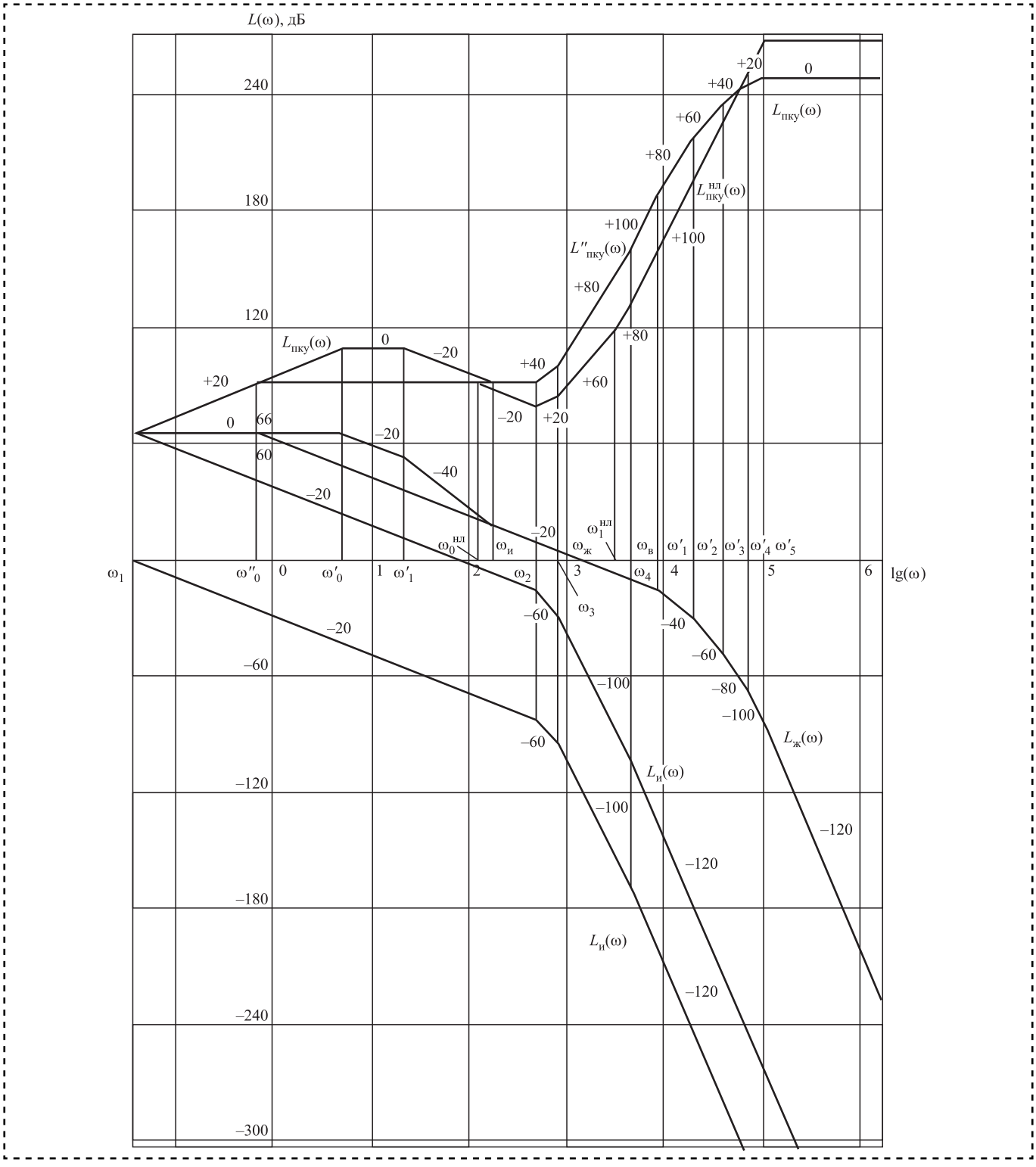


Рис. 6. Характеристики ЛАЧХ КС с СлПр

щего устройства $L_{пку}(\omega)$ [2]. Анализ $L_{знч}(\omega)$ показывает, что среднечастотная часть смещена в область отрицательных частот. Это делает ЦМ КС со СлПр нестабильной.

Для построения $L_ж(\omega)$ определим ее параметры. Из технического задания (ТЗ) известно, что $T_ж = T_п = 6{,}7\cdot10^{-3}$ с; $\sigma_ж = (5...8)$ %.

Воспользовавшись номограммой качества $\sigma = f(P_м)$ и $T_п = f(P_м)$ [2] для заданного σ, $T_п = T_ж$, получим:

$$\omega_с = \omega_ж = \frac{2T_1}{T_ж};$$

$$\omega_ж = \frac{2T_1}{6{,}7\cdot10^{-3}} = 937{,}789.$$

Среднечастотный участок ЛАЧХ задается $\omega_ж$, $\omega_н$, $\omega_в$ и углом наклона −20 дБ/дек: $\omega_н = (0{,}14...0{,}18)\omega_ж$; принимаем $\omega_н = 0{,}14\omega_ж = 0{,}14\cdot937{,}789 = 131{,}29$; $\omega_в = (6...7)\omega_ж$; принимаем $\omega_в = 7\omega_ж = 7\cdot937{,}789 = 6564{,}523$;

$$\lg\omega_ж = \lg937{,}789 = 2{,}972;$$

$$\lg\omega_н = \lg131{,}290 = 2{,}1182;$$

$$\lg\omega_в = \lg6564{,}523 = 3{,}817.$$

По этим значениям построим среднечастотную часть желаемой характеристики ЛАЧХ [$L_ж(\omega)$]. Первое звено ЛАЧХ (низкочастотная часть) проходит через точку 66 дБ на оси $\lg\omega = 0$ дБ с тем же наклоном, что и первое звено нескорректированной системы [СлПр ($\omega = 1$; $\lg\omega = 0$; уровень 66 дБ)]. Астатизм СлПр $\nu_ж = 0$; $K_ж = 2000$; $20\lg2000 = X$ дБ; $X = 20\cdot3{,}3 = 66$ дБ, $L_{пку}(\omega)$ определяем методом графического сложения по рис. 6 или используя пакет программ MatLab или СС.

Наиболее распространена и эффективна последовательная коррекция ЦМ КС с СлПр АТО $W_{пку}$ (рис. 7).

Определим параметры $L_{пку}(\omega)$ путем построения желаемой характеристики $L_ж(\omega)$ и вычитания из нее $L_{знч}(\omega)$:

$$L_{пку}(\omega) = L_ж(\omega) - L_{знч}(\omega).$$

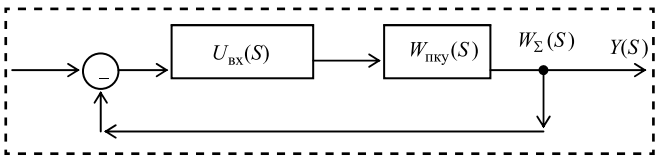


Рис. 7. Схема установки последовательной коррекции

Сопрягаем для более плавного перехода на будущей характеристике $L_{пку}(\omega)$ низкочастотную часть ЛАЧХ со среднечастотной двумя звеньями с наклонами соответственно −40 дБ/дек и −20 дБ/дек. Частоты ω_0^1 и ω_1^1 подбираются экспериментально:

$$\omega_0^1 = 5{,}248;\ \lg\left(\omega_0^1\right) = 0{,}77;\ \omega_1^1 = 10;\ \lg\left(\omega_1^1\right) = 1.$$

Высокочастотная часть $L_ж(\omega)$ имеет тот же наклон, что и высокочастотная часть ЛАЧХ нескорректированной системы СлПр (−120 дБ/дек).

Вправо достроим пять апериодических звеньев. Частоты сопряжения определим экспериментально:

$$\omega_в = \omega_1^1 = 6564{,}523;\ \lg(\omega_в) = \lg6564{,}523 = 3{,}817;$$

$$\omega_2^1 = 10\ 000;\ \lg\left(\omega_2^1\right) = \lg10\ 000 = 4;$$

$$\omega_3^1 = 21379{,}62;\ \lg\left(\omega_3^1\right) = \lg21379{,}62 = 4{,}33;$$

$$\omega_4^1 = 46773{,}51;\ \lg\left(\omega_4^1\right) = \lg46773{,}51 = 4{,}67;$$

$$\omega_5^1 = 100\ 000;\ \lg\left(\omega_5^1\right) = \lg100\ 000 = 5.$$

По этим значениям строим желаемую характеристику ЛАЧХ.

Определим параметры корректирующего устройства $L_{пку}$:

$$W_{пку}(S) = K_ж \times$$
$$\times \frac{\left[\left(\frac{1}{\omega_1}\right)S+1\right]\left[\left(\frac{1}{\omega_н}\right)S+1\right]\left[\left(\frac{1}{\omega_2}\right)^2S^2+2\xi_2\left(\frac{1}{\omega_2}\right)S+1\right]}{\left[\left(\frac{1}{\omega_0^1}\right)S+1\right]\left[\left(\frac{1}{\omega_1^1}\right)S+1\right]\left[\left(\frac{1}{\omega_в}\right)S+1\right]\left[\left(\frac{1}{\omega_2^1}\right)S+1\right]\left[\left(\frac{1}{\omega_3^1}\right)S+1\right]} \rightarrow$$
$$\rightarrow \frac{\left[\left(\frac{1}{\omega_3}\right)^2S^2+2\xi_3\left(\frac{1}{\omega_3}\right)S+1\right]\left[\left(\frac{1}{\omega_4}\right)S+1\right]}{\left[\left(\frac{1}{\omega_4^1}\right)S+1\right]\left[\left(\frac{1}{\omega_5^1}\right)S+1\right]}.$$

По сопрягающим частотам находим соответствующие им времена:

$$T_1 = 16{,}32\ \text{с};\qquad T_1^1 = 0{,}1\ \text{с};$$
$$T_2 = 2{,}22\cdot10^{-3}\ \text{с};\qquad T_0^1 = 0{,}191\ \text{с};$$
$$T_3 = 6{,}94\cdot10^{-4}\ \text{с};\qquad T_2^1 = 10^{-4}\ \text{с};$$
$$T_4 = 2{,}19\cdot10^{-4}\ \text{с};\qquad T_3^1 = 4{,}68\cdot10^{-5}\ \text{с};$$
$$T_н = 7{,}617\cdot10^{-3}\ \text{с};\qquad T_4^1 = 2{,}138\cdot10^{-5}\ \text{с};$$
$$T_в = 1{,}523\cdot10^{-4}\ \text{с};\qquad T_5^1 = 10^{-5}\ \text{с}.$$

Анализ $L_{\text{пку}}$ показывает, что частота среза $\omega_{\text{ж}} = 937{,}789$ лежит левее линии $\omega_L = 1/T_L$:

$$\lg\omega_L = \lg(1/T_L) = \lg 4545{,}45 = 3{,}658.$$

Это правильно и позволяет использовать $L_{\text{пку}}$ для коррекции ЦМ КС с СлПр АТО. Высокочастотная часть $L_{\text{пку}}(\omega)$ расположена правее линии ω_L, поэтому дальнейший подъем высокочастотной части $L_{\text{пку}}(\omega)$ невозможен из-за физических ограничений блока $W_1(S)$.

Включим в схему ЦМ КС с СлПр коррекцию $W_{\text{пку}}(S)$.

Исследование скорректированной ЦМ КС АТО СлПР в режиме вынужденных колебаний дает переходный процесс, у которого время $T_{\text{п}}$ близко к заданному, а величина перерегулирования $\sigma = 0{,}26 > \sigma_{\text{з}}$. Необходимо дальнейшее совершенствование $L_{\text{пку}}$. Теория автоматического управления позволяет сопрягать низкочастотную и среднечастотную части звеньями с любым наклоном, кратным 20 дБ/дек. Заменим два сопряженных звена $(\omega_0' S + 1)^{-1}(\omega_1' S + 1)^{-1}$ на одно $(\omega_0'' S + 1)^{-1}$ с наклоном −20 дБ/дек.

Это вызовет незначительное уменьшение добротности привода и уменьшит величину перерегулирования. В этом случае

$$\omega_0'' = 0{,}33;\ \lg(\omega_0'') = \lg 0{,}33 = -0{,}48;\ T_0'' = 3{,}03\ \text{с};$$

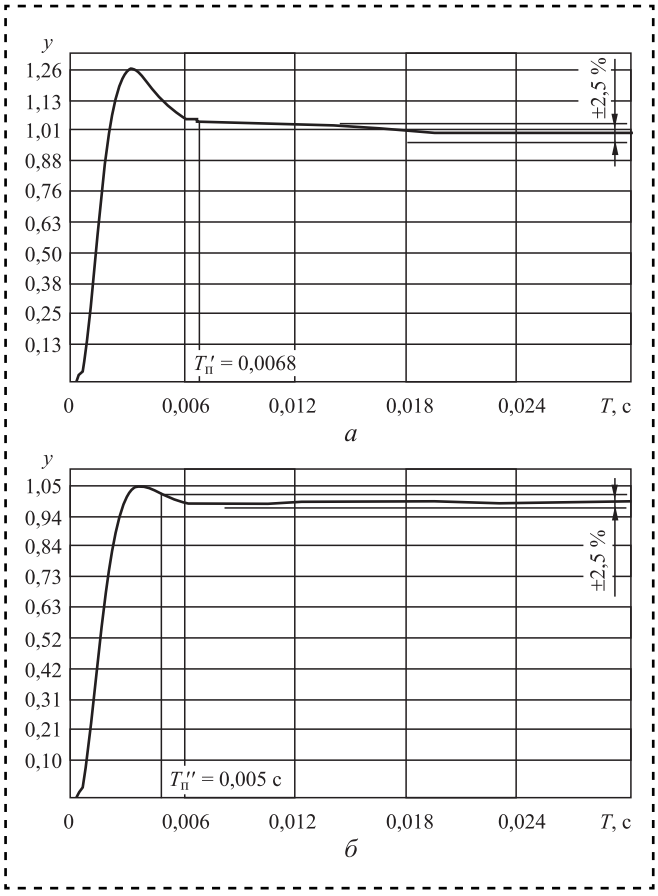


Рис. 8. Собственные колебания скорректированной линейной системы КС с ЭГ СлПр и цилиндром при совершенствовании ПКУ:
а, *б* — стадии переходного процесса

$$W_{\text{пку}}''(S) = 2000\frac{(16{,}32S+1)(4{,}93\cdot10^{-6}S^2 + 8{,}88\cdot10^{-4}S+1)}{(3{,}03S+1)(1{,}523\cdot10^{-4}S+1)(10^{-4}S+1)(4{,}68\cdot10^{-5}S+1)}\times$$
$$\times\frac{(4{,}81\cdot10^{-7}S^2 + 2{,}774\cdot10^{-4}S+1)(2{,}19\cdot10^{-4}S+1)}{(2{,}138\cdot10^{-5}S+1)(10^{-5}S+1)}.$$

Передаточная функция ЛАЧХ линейной скорректированной ЦМ КС с СлПр КС АТО, удовлетворяющей требованиям ТЗ, показана на рис. 8:

$$W_{\text{скор}}(S) = W_{\text{пку}}''(S)W_{\Sigma}(S);$$

$$\text{W}_{\text{скор}}(S) = \frac{2000}{(3{,}035S+1)(1{,}523\cdot10^{-4}S+1)(10^{-4}S+1)(4{,}68\cdot10^{-5}S+1)(2{,}138\cdot10^{-5}S+1)(10^{-5}S+1)}.$$

Нелинейная модель КС с ЭГ СлПр [1] (см. рис. 3) содержит следующие блоки: *1*, *5—10*, *15*, *33*, *34*, *18*, *20*, *22—32*, *39—49*. Возможны еще блоки — *2*, *3*, *4*, *16* (*31* — вычитания; *30*, *32*, *41* и *42* — умножения; *43*, *44* — сложения; *23* — извлечения корня; *24*, *29* — модуля сигнала; *20*, *26*, *28* — сигнатуры сигнала (релейная характеристика); *27* — уровня давления $p_{\text{п}}$; *16* — потерь давления от сил резания; *18* — потерь давления от сил трения в направляющих стола; *22* — потерь давления от сил трения в ГЦ; *9* — нелинейностей типа нечувствительность и насыщение.

Учет нелинейностей. Блоки *20*, *26*, *28* символизируют релейный характер трения (коэф-

фициент $\gamma = \pm 1$). Блок *9* — реализует нелинейности типа нечувствительность и насыщение ($x_1 = \pm 3 \cdot 10^{-4}$; $x_2 = \pm 0{,}12$; $y = \pm 954$). Блок *27* — уровень подаваемого давления масла. Блоки *16*, *18*, *22* нужны для реализации полезной нагрузки ($K_{16} = 9$), а также нагрузки от сил трения в направляющих ($K_{18} = 0{,}65$) и трения поршня и штока ($K_{22} = 49{,}2$).

Блоки *24* и *39* необходимы, чтобы на их выходе был модуль выходного сигнала.

Исследование нелинейной ЦМ СлПр КС АТО с $W_{\text{пку}}(S)$

После подключения к модели указанных блоков, установки в них заданных значений, подсоединения обратной связи (ДОСп) (в качестве корректирующего устройства использовали полученное при настройке линейной модели корректирующее устройство $W''_{\text{пку}}(S)$) исследовали нелинейную ЦМ КС с СлПр в режиме собственных колебаний. Вид кривой переходного процесса (рис. 9) говорит о том, что имеются низкочастотные затухающие колебания, на которые наложены высокочастотные. Колебания имеют постоянную амплитуду. Значит КС с приводом СлПр нестабильна как в области высоких, так и низких частот.

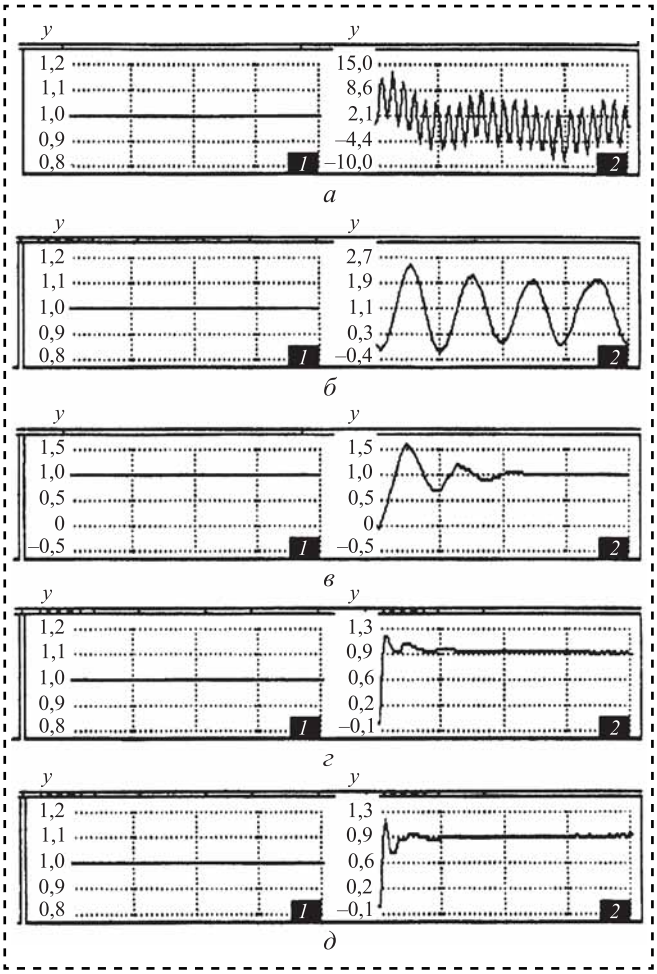


Рис. 9. Собственные колебания частично скорректированной нелинейной системы КС с ЭГ СлПр и цилиндром: *а—д* — стадии процесса; *1* — генератор; *2* — координатный стол

Стабильность СлПр можно увеличить, если увеличить протяженность среднечастотного участия ЛАЧХ. Продлевая его вправо от частоты среза, повысим стабильность в высокочастотной области. Тем самым снимем высокочастотную модуляцию:

$$\omega_{\text{в}}^{\text{нл}} = 10^5; \quad T_{\text{в}}^{\text{нл}} = \frac{1}{\omega_{\text{в}}^{\text{нл}}} = 10^{-5}; \quad \lg(\omega_{\text{в}}^{\text{нл}}) = \lg(10^5) = 5.$$

В передаточной функции $W''_{\text{пку}}(S)$ опускание ЛАЧХ до оси частот (линии 0 дБ) можно добиться пятью апериодическими звеньями с сопрягающими частотами $\omega_{\text{в}}$, ω'_2, ω'_3, ω'_4 и ω'_5. Так как частота $\omega_{\text{в}}$ переносится вправо, то остальные сопрягающие частоты переносятся туда же. Но в области высоких частот пакет SIAM работает менее стабильно и медленно. Поэтому опустим ЛАЧХ до точки с частотой $\omega_{\text{в}}^{\text{нл}}$ (здесь ЛАЧХ имеет наклон + 100 дБ/дек). Для этого применим два колебательных и одно апериодическое звено с одинаковыми сопрягающими частотами (см. рис. 6): $\omega_A^{\text{нл}} = \omega_{\text{в}}^{\text{нл}} = 10^5$.

В этом случае корректирующее устройство примет вид (первый этап совершенствования коррекции нелинейной ЦМ):

$$W_{\text{пку}}^{\text{нл1}}(S) = 2000 \times$$

$$\times \frac{(16{,}32S + 1)(4{,}93 \cdot 10^{-6}S^2 + 8{,}88 \cdot 10^{-4}S + 1)}{(3{,}03S + 1)(10^{-5}S + 1)(10^{-10}S^2 + 2 \cdot 10^{-5}S + 1)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(4{,}81 \cdot 10^{-7}S^2 + 2{,}774 \cdot 10^{-4}S + 1)(2{,}19 \cdot 10^{-4}S + 1)}{(10^{-10}S^2 + 2 \cdot 10^5 S + 1)}.$$

Исследуем нелинейную ЦМ КС с СлПр с корректирующим устройством $W_{\text{пку}}^{\text{нл}}(S)$ в режиме собственных колебаний. Переходный процесс представлен на рис. 9. Высокочастотные колебания удалось устранить, но процесс носит пока колебательный характер.

На втором этапе совершенствования коррекции нелинейной системы ЦМ КС введем еще одно апериодическое звено, вызывающее отрицательный фазовый сдвиг. Сопряженную частоту подберем близкой к частоте колебаний (см. рис. 9, $T \approx 0{,}01$; $\omega = 10^2$). Это звено опустит

ЛАЧХ на −20 дБ/дек, что должно увеличить устойчивость системы как в области средних, так и высоких частот.

Для компенсации введенного апериодического звена введем форсирующее апериодическое звено. Сопрягающую частоту последнего определим экспериментально, выбрав ее вначале немного меньше ω_2, а затем постепенно увеличим ее, пока не будут подавлены колебания в кривой переходного процесса. При этом:

$$\omega_0^{\text{нл}} = 100;\ \lg\left(\omega_0^{\text{нл}}\right) = \lg 100 = 2;\ T_0^{\text{нл}} = 10^{-2};$$

$$\omega_1^{\text{нл}} = 3333,3;\ \lg\left(\omega_1^{\text{нл}}\right) = \lg 3333,3 = 3,523;$$

$$T_1^{\text{нл}} = 3 \cdot 10^{-4};$$

$$W_{\text{пку}}^{\text{нл2}}(S) = 2000 \times$$

$$\times \frac{(16,32S+1)(4,93 \cdot 10^{-6}S^2 + 8,88 \cdot 10^{-4}S + 1)}{(3,03S+1)(10^{-5}S+1)(10^{-10}S^2 + 2 \cdot 10^5 S + 1)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(4,81 \cdot 10^{-7}S^2 + 2,774 \cdot 10^{-4}S + 1)}{(10^{-2}S+1)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(2,19 \cdot 10^{-4}S+1)(3 \cdot 10^{-4}S+1)}{1}.$$

Переходный процесс ЦМ СлПр с $W_{\text{пку}}^{\text{нл2}}$ показан на рис. 9. Колебания стабилизированы, процесс — быстро затухающий, но величина перерегулирования $\sigma > \sigma_з$ и время $T_{\text{п}}$ — пока еще велики. Требуется дальнейшее совершенствование.

На третьем этапе совершенствования коррекции нелинейной модели ЦМ для уменьшения $T_{\text{п}}$ и σ увеличим демпфирование в области высоких частот. Увеличим коэффициенты демпфирования в двух форсирующих колебательных звеньях. Величину демпфирования подберем экспериментально:

$$\xi_2^{\text{нл}} = 5;\ 2\xi_2^{\text{нл}}\left(\frac{1}{\omega_2}\right) = 0,0111.$$

Анализ переходного процесса (см. рис. 9) показывает, что уменьшились $T_{\text{п}}$ и σ. Дальнейшее увеличение $\xi_2^{\text{нл}}$ может быть неэффективно.

Для дальнейшего уменьшения повысим демпфирование в следующем, еще более высокочастотном форсирующем звене. Значения $\xi_3^{\text{нл}}$ также подбираем экспериментально ($\xi_3^{\text{нл}} = 0,5$):

$$2\xi_3^{\text{нл}}\left(\frac{1}{\omega_3}\right) = 3,46771 \cdot 10^{-4}.$$

Дальнейшее увеличение $\xi_3^{\text{нл}}$ неэффективно, так как приводит к увеличению σ.

Улучшение качества нелинейной ЦМ КС с СлПр возможно путем более точного определения $\omega_0^{\text{нл}}$, $\omega_1^{\text{нл}}$, $T_0^{\text{нл}}$ и $T_1^{\text{нл}}$ экспериментальным способом:

$$\omega_0^{\text{нл}} = 83,3;\ \lg\left(\omega_0^{\text{нл}}\right) = \lg 83,3 = 1,921;$$

$$T_0^{\text{нл}} = 1,2 \cdot 10^{-2};$$

$$\omega_1^{\text{нл}} = 1333,3;\ \lg\left(\omega_1^{\text{нл}}\right) = \lg 1333,3 = 3,125;$$

$$T_1^{\text{нл}} = 7,5 \cdot 10^{-4}.$$

При этом корректирующее устройство в третьей последней редакции примет вид:

$$W_{\text{пку}}^{\text{нл3}} = 2000 \times$$

$$\times \frac{(16,32S+1)(4,93 \cdot 10^{-6}S^2 + 1,71 \cdot 10^{-2}S + 1)}{(3,03S+1)(10^{-5}S+1)} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(4,81 \cdot 10^{-7}S^2 + 3,46771 \cdot 10^{-4}S + 1)}{(10^{-10}S^2 + 2 \cdot 10^{-5}S + 1)^2} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{(2,19 \cdot 10^{-4}S+1)(7,5 \cdot 10^{-4}S+1)}{(1,2 \cdot 10^{-2}S+1)}.$$

Полученный при этом переходный процесс (рис. 10) и вынужденные колебания (рис. 11) позволяют заключить, что скорректированная нелинейная система ЦМ СлПр КС АТО удовлетворяет требованиям ТЗ.

Исследования КС с СлПр АТО с изменяемым каким-либо другим параметром выполняют аналогично. По полученным результатам строят графики зависимости $T_{\text{п}} = f(T_{\text{v}})$ и $f_{\text{п}} = f(T_{\text{v}})$.

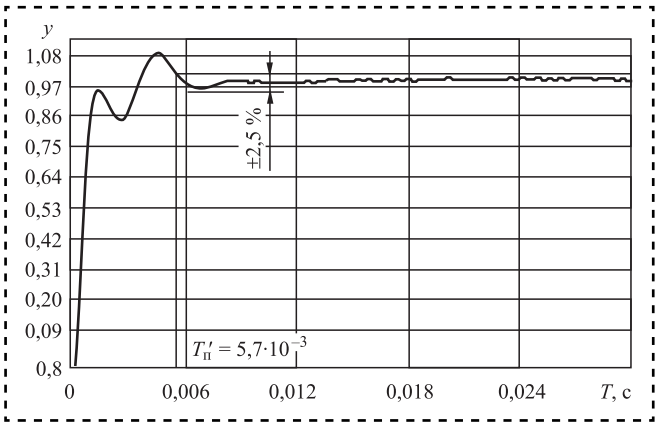


Рис. 10. Собственные колебания скорректированной нелинейной системы КС с ЭГ СлПр

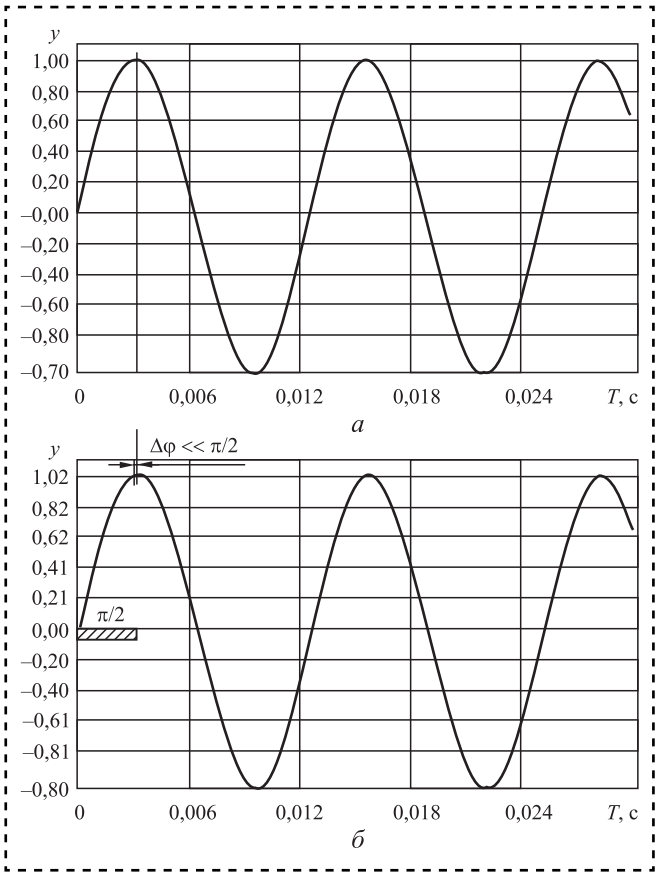


Рис. 11. Вынужденные колебания скорректированной нелинейной КС с ЭГ СлПр:
а — генератора; *б* — координатного стола

Методика эксперимента включает три этапа:

1. Исследование линейных ЦМ КС с СлПр и оптимизация параметров последовательного корректирующего устройства ПКУ в целях удовлетворения требований ТЗ по динамике СлПр (времени переходного процесса $T_п = 5 \cdot 10^{-3}$ с, $\sigma =$ = 5...8 %, добротности по скорости $K_v \geqslant 2000$ с$^{-1}$; $f_п \geqslant 1000$ рад/с, при затухании амплитуды выходного сигнала до 0,707 и сдвиге фаз менее $\pi/2$).

2. Исследование нелинейных ЦМ КС с СлПр и оптимизация параметров ПКУ до удовлетворения требований ТЗ по динамике СлПр.

3. Обобщение результатов исследования ЦМ КС с СлПр.

4. Построение графиков зависимости $T_п$ и $f_п$ в функции переменной, например $T_п = f(T_x)$ и $f_п = f(T_x)$.

Рассмотрим каждый этап на примере одного варианта более подробно.

Исследования линейной модели ЦМ СлПр:

— изучить входные данные на ЦМ КС с СлПр и требования к динамике СлПр;

— определить структуру и параметры ПКУ (свернуть блоки неизменяемой части ЦМ СлПр в один с передаточной функцией $W_Σ$ (S). С помощью пакета программ СС (или MatLab) преобразовать $W_Σ$ (S), записанную в виде единого уравнения, в набор стандартных звеньев: апериодических и колебательных. Построить ЛАЧХ: неизменяемой части $L_{неиз}$ (S), желательную $L_ж$ (S) и $L_{пку}$ (S);

— найти из меню два файла (один с генератором "ступенька" для исследования собственных колебаний, другой — с генератором "синусоида" для исследования вынужденных колебаний);

— установить в блоках значения коэффициентов и постоянных времени согласно входным данным;

— исследовать линейную ЦМ КС с СлПр в режиме собственных и вынужденных колебаний;

— выполнить анализ кривых переходного процесса и синусоид;

— изменяя параметры ПКУ, получить $T_п$, σ, K_v и $f_п$, соответствующие ТЗ.

Исследования нелинейной ЦМ КС с СлПр:

— создать два файла нелинейной ЦМ КС с СлПр с генераторами "ступенька" и "синусоида"; воспользоваться для этого $W_{пку}$ линейной модели, блоками неизменяемой части ЦМ СлПР и блоками нелинейностей;

— установить в них значения коэффициентов и постоянных времени по ТЗ:

— исследовать нелинейную ЦМ КС с СлПр в режиме собственных и вынужденных колебаний;

— выполнить анализ кривых переходного процесса и синусоид;

— изменяя параметры, а иногда и структуру ПКУ, получить $T_п$, σ, K_v и $f_п$, соответствующие ТЗ или близкие им.

Заключение

Создана модель координатной системы с быстродействующим следящим электрогидравлическим приводом.

Проведенные исследования динамики КС в линейном и нелинейном вариантах показали, что время переходного процесса составляет несколько миллисекунд при полосе пропускания 1000 рад/с и хорошем качестве регулирования. Это соответствует требованиям.

Библиографический список

1. **Иванов Ю.В.** Автоматизация производства ЭА. М.: Бином, 2016. 534 с.

2. **Техническая** кибернетика: в 4 т. / под ред. В.В. Солодовникова. М.: Машиностроение, 1991. 250 с.

3. **Гамынин И.С.** Основы следящего гидравлического привода. М.: Оборонгиз, 1962. 293 с.

4. **Попов Д.Н.** Расчет и проектирование электрогидравлического привода с дроссельным регулированием. М.: МГТУ, 1990. 26 с.

УДК 621.757

С.В. Кузнецова, *канд. техн. наук*
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)
E-mail: svkyznecova@gmail.com

Экспериментальная установка для распознавания движений деталей в процессе сборки

Экспериментальная установка является системой технического зрения с функцией слежения за перемещением детали в процессе сборки. Разработан виртуальный прибор для регистрации результатов экспериментов. Получены траектории движения детали при осуществлении сборки человеком. Процесс адаптации детали может быть воспроизведен виртуально с помощью анимации. Устройство может быть полезно при построении алгоритмов управления движением в системах автоматизированной сборки или их обучении.

The experimental mounting is the computer vision system with tracking function for the detail's movement at assembly process. The virtual instrument for registration of the experiment's results is developed. The detail's motion trajectories at the manual assembly are received. The detail's adaptation process may be virtual reproduced wherewith animation. The device may be wholesomely at the movement's control algorithms construction for automated assembly systems or theirs training.

Ключевые слова: виртуальная сборка, относительная и угловая адаптация, распознавание движений детали, система технического зрения, траектория движения.

Keywords: virtual assembly, linear and angular adaptation, the detail's movement recognition, the computer vision system, motion trajectory.

Введение

Процесс сборки заключается в управлении движением соединяемых деталей в целях совмещения их сопрягаемых поверхностей [1]. К настоящему времени проведен большой объем исследований в области автоматизации сборки, разработано множество способов сборки и устройств, реализующих их. Однако сборочная операция трудно поддается автоматизации. Промышленные машины значительно превосходят человека по точности и быстродействию, но справиться с задачами, которые с легкостью решает даже ребенок в процессе игры, им бывает не под силу. В чем же наше преимущество? Как научить машину тому, что умеем мы сами?

Проведено экспериментальное исследование движений при адаптации соединяемых деталей в процессе сборки человеком [2]. Задачу слежения за перемещением соединяемой детали решали с помощью технологий компьютерного зрения [3].

В основу алгоритма, который позволяет отслеживать перемещения соединяемой детали, положено распознавание цветных маркеров, установленных на ее оси (рис. 1 на стр. 2 обложки). Соединяемые детали — вал и втулка. Ось вынесена за пределы детали.

Экспериментальная установка для распознавания движений детали в процессе сборки включает две видеокамеры, непрозрачный экран, основание и ЭВМ (на рисунке не показана) (рис. 2 на стр. 2 обложки). С первой камеры получают изображение проекции оси детали в плоскости *XZ*, со второй — изображение в плоскости *YZ*. Камеры расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях, совмещены по координате *Z* (штативы на рисунке отсутствуют). Попадание самих деталей в поле зрения камер не обязательно. Экраны используют для устранения влияния случайных предметов (по характеристикам сходных с маркерами), колебаний яркости и т.п. Основание — это рабочая площадка для сборки деталей.

Этапы создания виртуального прибора, реализующего машинное зрение

Программное обеспечение экспериментальной установки построено на базе LabVIEW — графической среды разработки приложений, в которой программные модули называются Virtual Instruments (виртуальные приборы) [4].

Процесс создания алгоритма работы виртуального прибора для распознавания движения детали в процессе адаптации заключается в реализации следующих этапов (рис. 3).

- *Блок получения изображения:* подключение USB-камеры, настройка необходимых характеристик изображения и параметров видеопотока.
- *Блок создания шаблона маркера:* выделение на изображении области с интересующим объектом.
- *Блок выбора алгоритма поиска:* выбор одного из алгоритмов поиска объекта на изображении может варьироваться в зависимости от условий наблюдения.
- *Блок создания массива для поиска по шаблону:* создание массива для поиска по шаблону с помощью преобразования входного изображения в массив значений цветовой локализации и сравнение его с массивом, созданным по такому же принципу из шаблонного изображения.
- *Блок вывода изображения с маркером слежения:* вывод видеопотока с отслеживанием маркеров оси детали.
- *Блок экспорта координат маркеров:* сохранение координат движения маркеров оси адаптируемой детали при сборке.

Разработка программы для виртуального прибора распознавания движений детали в процессе сборки

Виртуальный прибор состоит из блок-диаграммы виртуального прибора для распознавания движения детали в процессе сборки для одной камеры (рис. 4) и лицевой панели виртуального прибора для одной камеры (рис. 5 на стр. 2 обложки). Для подключения второй камеры все действия аналогичны.

С помощью блока *Vision Acquisition* происходит захват видеоизображения с камеры (рис. 6 на стр. 3 обложки). Существует возможность управлять USB-устройствами и настройками USB-камер.

Инструмент *Vision Assistant* позволяет выполнять различные операции над изображением: например, создавать шаблоны цветных маркеров и осуществлять к ним привязку систем координат.

Содержимое передней панели *Vision Assistant* (рис. 7 на стр. 3 обложки):

— *обрабатываемое изображение* располагается в центре экрана; изменяется по мере того как над изображением осуществляются те или иные действия;

— *сценарий обработки* исходного изображения: окно внизу экрана, в котором путем выбора пиктограмм операций "пишется" последовательность действий над изображением;

— *набор палитр виртуальных инструментов* для обработки изображения.

Процесс создания массива заключается в том, что проводится сравнение с шаблоном, совпадения фиксируются и записываются в кластер для последующего использования (рис. 8). Чтобы выделить нужную область, необходимая часть кластера преобразуется в массив. Используемые функции: *Array to Cluster* (преобразует одномерный массив в кластер элементов того же типа, что и элементы массива), *Unbundle By Name* (разделение кластера по имени), *Build Array* (объединяет несколько массивов или добавляет элемент в массив).

Вывод изображения с маркером слежения реализуется с помощью встроенной функции *IMAQ Overlay Rectangle* (рис. 9). Данная функция использует созданный ранее массив для наложения прямоугольника на объект слежения. Из массива берутся координаты на входном изображении, которые соответствуют объекту слежения. Функция *Image Out* необходима для создания формы на лицевой панели для вывода конечного изображения.

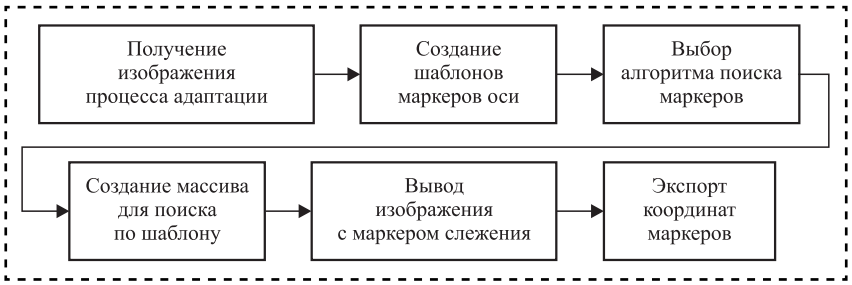


Рис. 3. Функциональные блоки программы по отслеживанию движений детали в процессе адаптации

Экспорт массивов координат маркеров оси детали реализуется либо непосредственно в программу анимации движения оси дета-

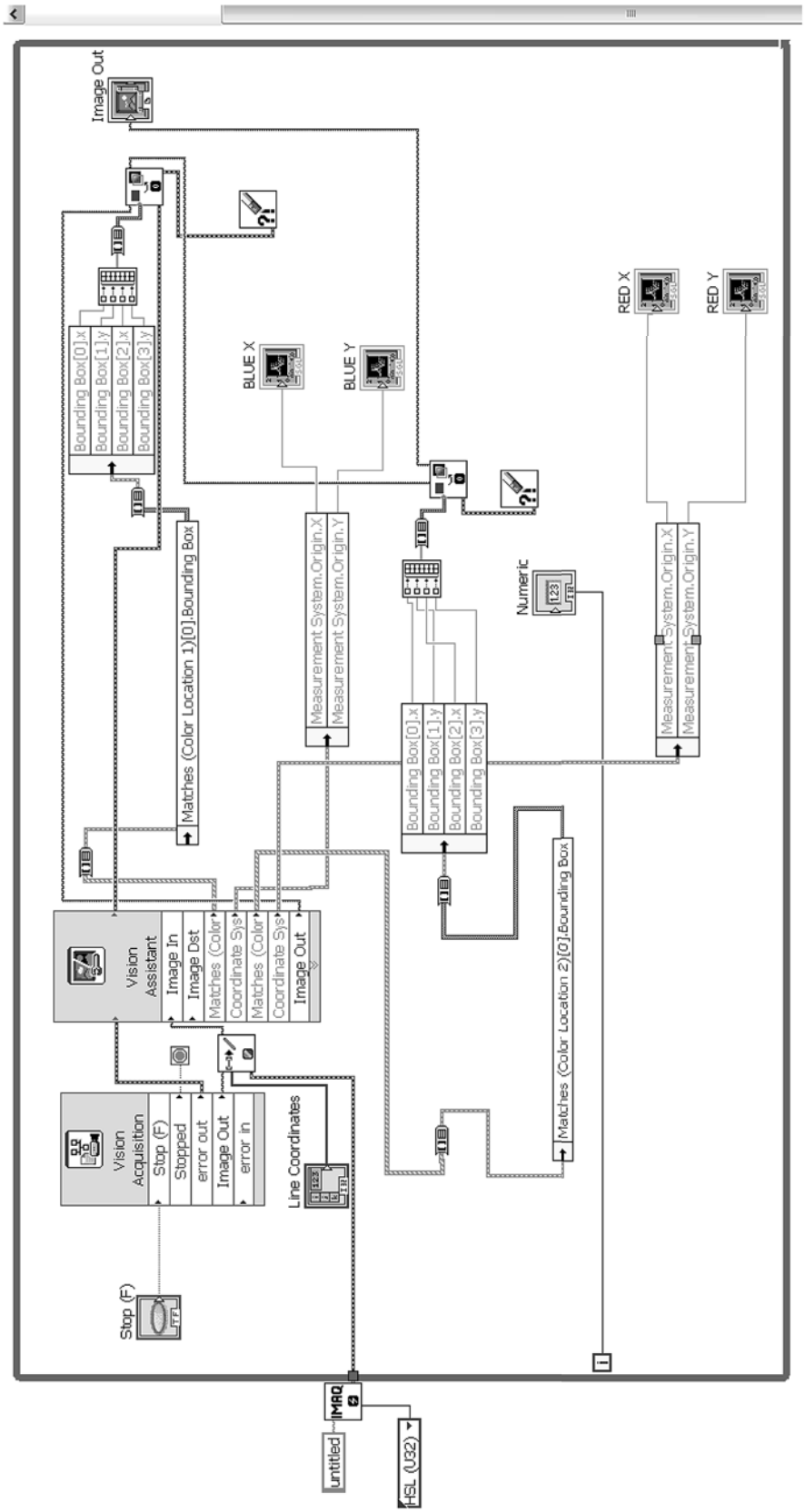


Рис. 4. Блок-диаграмма виртуального прибора для распознавания движений детали в процессе сборки (для одной камеры)

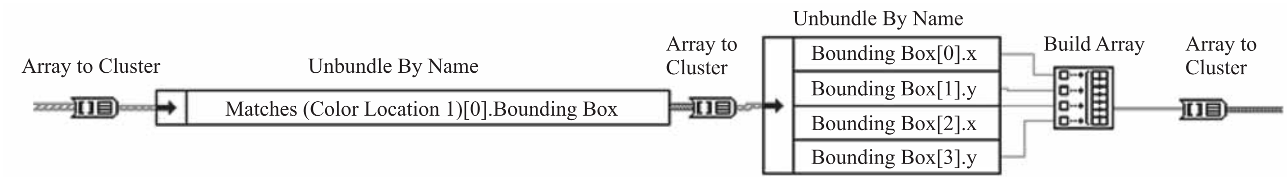


Рис. 8. Фрагмент программы, реализующий создание массива для поиска по шаблону

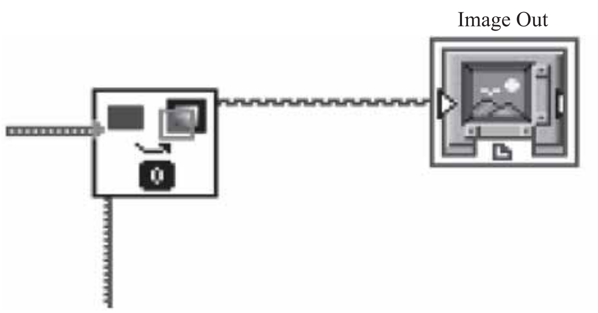


Рис. 9. Фрагмент программы, осуществляющий вывод изображения с маркером слежения

ли в двух- или трехмерном виртуальном пространстве (например, MatLab), либо в текстовый файл (или таблицу Excel).

Результаты экспериментальных исследований движений, совершаемых человеком в процессе адаптации присоединяемой детали при сборке

Результаты экспериментальных исследований адаптирующих движений присоединяемой детали в процессе ручной сборки получены с помощью разработанного виртуального прибора, реализующего машинное зрение (функцию трекинга — отслеживания, сопровождения). Скрипт в среде MatLab, позволяет воспроизвести движение оси детали с помощью анимации в виртуальном пространстве (рис. 10).

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%555
% АНИМАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ОСИ ДЕТАЛИ В ПРОЦЕССЕ СБОРКИ
% положение оси детали соответствует отрезку с двумя маркерам: красным и синим.
clear cls
X_r = load('e:/LABVIEW/X_r.txt');
Y_r = load('e:/LABVIEW/Y_r.txt');
Z_r = load('e:/LABVIEW/Z_r.txt');
X_b = load('e:/LABVIEW/X_b.txt');
Y_b = load('e:/LABVIEW/Y_b.txt');
Z_b = load('e:/LABVIEW/Z_b.txt');
X_r = X_r(:,(2));
Y_r = Z_r(:,(2));
Z_r = Z_r(:,(2));
X_b = X_b(:,(2));
Y_b = Z_b(:,(2));
Z_b = Z_b(:,(2));

axis([0 640 0 480 0 640])
grid on
hold on
plot3(X_r, Y_r, Z_r, 'LineWidth', 2, 'Color', [1 0 0])
hold on
plot3(X_b, Y_b, Z_b, 'LineWidth', 2, 'Color', [0 0 1])

h = plot3(X_r(1), Y_r(1), Z_r(1), 'ro', 'MarkerSize', 12, 'MarkerFaceColor', [1 0 0]);
h1 = plot3(X_b(1), Y_b(1), Z_b(1), 'o', 'MarkerSize', 12, 'MarkerFaceColor', [0 0 1]);
ho = line([X_r(i), X_b(i)], [Y_r(i), Y_b(i)], [Z_r(i), Z_b(i)]);
    for I = 1:nume1(X_r)
        set(h, 'XData', X_r(i), 'YData', Y_r(i), 'ZData', Z_r(i))
        set(h1, 'XData', X_b(i), 'Ydata', Y_b(i), 'ZData', Z_b(i))
            set(ho, 'XData', [X_r(i), X_b(i)], 'YData', [Y_r(i), Y_b(i)], 'ZData', [Z_r(i), Z_b(i)], 'lineWidsth', 2, 'Color', [0 0 0])
        plot3(X_r(i), X_b(i)], [Y_r(i), Y_b(i)], [Z_r(i), Z_b(i)], 'Color', [0 0 0]);
        pause(0.1)
    end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Рис. 10. Скрипт MatLab, позволяющий воспроизвести анимацию движений оси детали в процессе адаптации при сборке

Визуализация траекторий движения оси детали при сборке на плоскости и в пространстве с использованием одной и двух камер соответственно приведена на рис. 11 на стр. 4 обложки и 12 на стр. 4 обложки.

Проведено 50 экспериментов, в ходе которых группе студентов (10 человек) предложили осуществлять ручную сборку деталей типа вал—втулка, соединяемых по посадке $\frac{H11}{h12}$, диаметр 12 мм. В процессе сборки предлагали использовать зрительную и тактильную сенсорные системы (см. рис. 11, *а* и рис. 12, *а*, *б*); исключить тактильную сенсорную систему (рис. 11, *б*); исключить зрительную сенсорную систему (рис. 11, *в* и рис. 12, *в*, *г*).

Сборка завершилась успешно:

— в 82 % случаев при использовании всех органов чувств;

— в 44 % случаев при исключении зрительной системы;

— в 25 % случаев при исключении тактильной сенсорной системы.

Траектория движения детали характеризуется двумя этапами:

1-й этап — относительная (линейная) адаптация (присутствует на протяжении всей траектории);

2-й этап — угловая адаптация (осуществляется на конечном участке траектории).

Этапы линейной и угловой адаптации могут протекать одновременно на конечном участке траектории движения.

Траектория характеризуется выраженными участками разгона, торможения (большая плотность линий) и движения с постоянной (приближенно) скоростью (меньшая плотность).

Оценка влияния сенсорных систем на характер траекторий:

— преимущественно позиционная траектория при использовании всех органов чувств;

— поисковая траектория (спирали, периодическое сканирование поверхности) при исключении зрительной системы;

— повторяющееся движение совмещения в сочетании с угловой адаптацией при исключении тактильной системы.

В системе автоматизированной сборки целесообразно использовать сочетание сенсорных систем: системы технического зрения для линейной адаптации (при обнаружении отверстия, для быстрого позиционирования в область малых рассогласований) и тактильной системы (силомоментного очувствления) для угловой адаптации положения детали (на завершающем этапе при устранении перекосов, заклинивания и деформаций в процессе движения совмещения).

Заключение

Разработана экспериментальная установка для распознавания движений присоединяемой детали в процессе сборки. Установка является системой технического зрения с функцией слежения. Получены траектории движения детали при осуществлении сборки человеком. Процесс адаптации, т.е. приспособления положения и ориентации детали в целях совмещения сопрягаемых поверхностей воспроизводится виртуально с помощью анимации. Результаты экспериментов могут быть полезны при разработке алгоритмов управления движением сборочных устройств или их обучении.

Библиографический список

1. **Кузнецова С.В.** Управляемость и наблюдаемость системы автоматизированной сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 4.

2. **Симаков А.Л.** Обоснование методов и средств адаптации соединяемых деталей на базе принципов автоматического управления и выявленных взаимосвязей при автоматизированной сборке: дис.... д-ра техн. наук: 05.13.06. Ковров, 2003. 373 с.

3. **Кузнецова С.В.** Распознавание угловой ориентации детали при автоматизированной сборке с помощью систем технического зрения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 5.

4. **Кузнецова С.В.** Виртуальный прибор как средство сбора и визуализации результатов эксперимента // Материалы V междунар. научно-технической интернет-конференции "Информационные технологии в образовании, науке и производстве". Минск: БНТУ. 2017. [Электронный ресурс]. URL: http://www.bntu.by/images/stories/mido/ntik5/kuznetsova1.pdf

УДК 004.04+658.5

В.В. Новиков, *д-р техн. наук*
(Черноморское высшее военно-морское училище им. П.С. Нахимова, г. Севастополь),
К.Н. Осипов, *канд. техн. наук (Севастопольский государственный университет)*
E-mail: assistenttmm@mail.ru

Оценка технического состояния сложных технических систем методом равновесных состояний

Предложен универсальный подход к оценке технического состояния сложных технических изделий в режиме реального времени испытаний или процесса диагностирования, основанный на исследовании сохранения стационарных функциональных взаимосвязей между отдельными скалярными, в том числе нестационарными, процессами изменения отдельных диагностических параметров изделий. Преимущества предложенной методики проиллюстрированы на примере исследования данных приемосдаточных испытаний двигателей.

The new method for the estimation technical state of the complex machines based on the method of equilibrium states is proposed. The main idea is the following. The non-stationary time series of informative diagnostic machine parameters which characterize the working capacity of the machine are connected with each other by the stationary statistical dependencies. Identification of the changes in the dependencies is the basis for the proposed information technology to check the performance of the tested machines.

Ключевые слова: диагностика, испытания, оценка состояния, математическое моделирование, идентификация.

Keywords: diagnostics, testing, state estimation, math modeling, identification.

Решение задач математического, аппаратного и программного обеспечения процесса принятия достоверных решений относительно годности к дальнейшей эксплуатации сложных технических изделий, в том числе изделий оборонно-промышленного комплекса, в ходе приемосдаточных и контрольных испытаний актуально и своевременно [1, 2]. Это объясняется ужесточением требований к качеству и экономичности выпускаемых изделий, а также необходимостью развития новых и совершенствования существующих отечественных импортозамещающих и конкурентоспособных интеллектуальных технологий.

К настоящему времени отечественные и зарубежные исследователи (О.В. Абрамов, Е.Л. Первухина, В.В. Голикова, Я.З. Ципкин, А.Х. Хайрулин, В.С. Бахвалова, В.И. Биргер, Р.И. Адгамова, E. Grobbelaar, B. John, L. Heywood и др.) разработали большое число методов и средств технического контроля, испытаний, диагностики и технического прогнозирования, а также методологий оптимизации, моделирования и идентификации процессов и объектов испытаний. Однако интенсивное непрерывное увеличение сложности современных изделий общего и специального машиностроения привело к тому, что многие из предлагаемых методов уже не соответствуют уровню сложности испытуемых изделий, что проявляется в наложении на существующие методы моделирования и испытаний ряда ограничений, связанных с объемом производств, наличием априорной информации об испытуемых объектах и условиях испытаний и т.д. Тем не менее накопленный опыт, особенно в области моделирования и оптимизации сложных технических объектов и

систем, может служить основой для дальнейшего совершенствования методов идентификации объектов и процессов испытаний в целях обеспечения заданного уровня точности решений относительно годности испытуемых изделий к условиям будущей эксплуатации.

Цель работы — разработка математического аппарата для производственных испытаний сложных технических изделий в целях обеспечения достоверности принимаемых решений относительно их соответствия требованиям нормативной технической документации и условиям будущей эксплуатации.

В ходе производственных испытаний техническое состояние сложных технических изделий, под которыми понимают объекты сложной структуры, состоящие из большого числа конструктивно отличающихся узлов и элементов с различными принципами действия и рабочими процессами различной физической природы, объединенных большим числом связей, аналитическое описание которых затруднено или невозможно, определяется совокупность структурных или диагностических параметров. При этом диагностические параметры используют в случаях, когда невозможно прямое измерение структурных параметров [3].

Критерий соответствия испытуемых изделий требованиям завода-изготовителя — соответствие отдельных измеренных значений диагностических или структурных параметров эталонным значениям. В некоторых случаях для сопоставления с эталонными значениями используют не скаляр, а вектор (т.е. совокупность) параметров. Аналитическое описание правила принятия решения обычно представляют в следующем виде [4]:

$$\begin{cases} x > [x], & x \in D_1; \\ x < [x], & x \in D_2, \end{cases} \qquad (1)$$

где x — текущее значение диагностического параметра (вектора параметров);

$[x]$ — эталонное значение диагностического признака (вектора параметров);

D_1 — исправное состояние;

D_2 — неисправное состояние.

Основание для использования такого обобщенного правила принятия решений для различных объектов и систем — наличие у отличающихся по конструкции, технологии изготовления, области применения изделий сходных формальных черт, с точки зрения задач идентификации, анализа состояния и управления. Недостатком указанного критерия является сложность определения эталонных значений диагностических параметров из-за наличия так называемого риска пропуска цели и ложной тревоги, что объясняется пересечением функций распределения исследуемых параметров, соответствующих области исправного D_1 и неисправного D_2 состояний (рис. 1). Так, в работах В.И. Биргера (например, [4]) было показано, что пересечение плотностей вероятностей распределения состояний в подавляющем большинстве прикладных случаев принципиально не позволяет выбрать такие эталонные значения диагностических параметров, при которых правило (1) не давало бы ошибки.

Кроме этого, критерий (1) не предполагает контроля сохранения взаимосвязи между параметрами изделий, содержащей информацию о техническом состоянии [6].

Например, крутящий момент, развиваемый исправным двигателем внутреннего сгорания, как функцию угловой скорости ω, потока воздуха μ_f и топлива μ_a, проходящего через впускной коллектор, с учетом коэффициента эффективности преобразования энергии η_w, описывают выражением [5]:

$$M_{\text{кр}} = \frac{1}{\omega}\eta_w q \mu_f, \qquad (2)$$

где q — теплоемкость топлива;

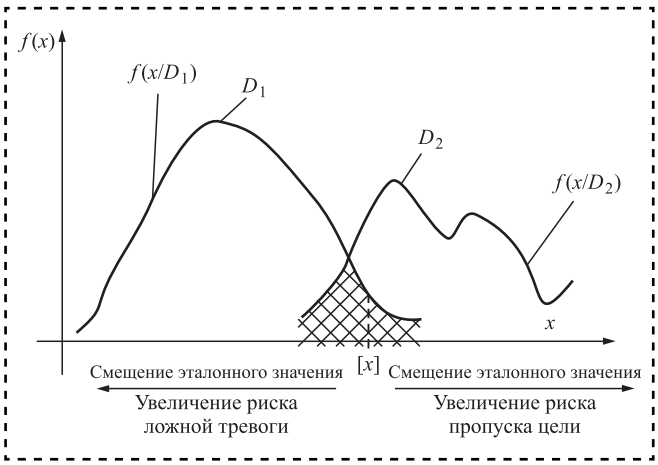


Рис. 1. Статистическое распределение плотности вероятности диагностического параметра x для исправного D_1 и неисправного D_2 состояний

$\mu_f = \frac{1}{14,7}\mu_a$ — поток топлива;

$\mu_a = \eta_a \varphi(P_a)\varphi_2(\alpha)$ — поток воздуха;

P_a — давление воздуха на впуске;

$0 < \eta_a < 1$;

α — угол открытия дроссельной заслонки;

$\varphi(P_a)$ и $\varphi(\alpha)$ — нелинейные функции, характеризующие поток воздуха, проходящий через единицу площади дроссельной заслонки.

Уравнение (2) при заданном значении коэффициента эффективности преобразования энергии справедливо для исправного изделия на протяжении всего срока службы двигателя даже в условиях его работы на переходных режимах, а также в условиях воздействия внешних неконтролируемых возмущений, например, вызванных случайным изменением нагрузки на двигатель. Такое состояние двигателя, соответствующее исправному состоянию, можно считать устойчивым. Изменение технического состояния двигателя, например, износ компрессионных колец, разрушение уплотнительных элементов между блоком двигателя и головкой блока цилиндров, разрушение, появление трещин в системе питания воздухом и т.д. вызовет изменение в соотношении между параметрами, входящими в уравнение (1). Данное изменение взаимосвязей между параметрами можно рассматривать, как переход из устойчивого работоспособного состояния системы в новое состояние — неисправное или неработоспособное. При этом неисправное состояние изделия, при котором оно еще способно выполнять заданные функции, но, например, с большими потерями на трение, можно считать граничным, т.е. находящимся на границе устойчивости, в то время как неработоспособное состояние будет соответствовать случаю потери устойчивости. Поэтому для достоверной оценки технического состояния систем необходимо контролировать не только попадание анализируемых параметров в поле допуска, но и сохранение стабильной взаимосвязи между отдельными параметрами.

Таким образом, возникает задача отыскания универсального критерия, использование которого позволяло бы формировать решение относительно годности испытуемых изделий к условиям будущей эксплуатации, с учетом оценки сохранения взаимосвязей между параметрами изделий в режиме реального времени испытаний и накопления информации о предшествующих состояниях с заданным шагом упреждения или запаздывания.

Пусть в каждый дискретный момент времени $t = 1, 2, 3, \ldots$ измерительная информация в системе диагностирования или испытаний представляет случайный $n\times1$-вектор $x_t = (X_{1,t}, \ldots, X_{i,t}, \ldots, X_{n,t})^{\mathrm{T}}$, содержащий значения n параметров в этот момент времени, $i = 1...n$ [5, 10, 11]. Тогда упорядоченные по времени последовательности или скалярные процессы изменения всех изучаемых параметров образуют единый многомерный случайный процесс с дискретным временем. Основание для объединения отдельных скалярных процессов в единый многомерный процесс — наличие функциональной взаимосвязи между параметрами изделий, определяемой физикой протекающих процессов. Указанное объединение отдельных скалярных процессов в единый многомерный процесс позволяет рассматривать его как многомерный временной ряд, согласно терминологии, введенной Боксом и Дженкинсом [6].

В процессе эксплуатации или испытаний в зависимости от режимов работы изделий диапазон изменения значений диагностических параметров может быть различным, однако эти отдельные процессы, будучи объединенными в один многомерный ряд, например в пару, имея общий тренд, обусловленный режимом работы изделия, будут удаляться друг от друга на малую величину. Другими словами, будет наблюдаться сохранение функциональных взаимосвязей между параметрами технически исправных изделий. При этом анализ многократных результатов испытаний различных машиностроительных изделий, показал, что даже при отклонении системы от данного равновесного состояния из-за различных внешних факторов она все равно стремится вернуться к нему [3, 7].

Предположение 1. Если x_t — вектор физических переменных величин, описывающих техническое состояние заданной системы, то ее равновесное состояние, соответствующее технически исправному состоянию, достигается при выполнении следующего линейного ограничения:

$$\beta' x_t = 0, \qquad (3)$$

где $'$ — знак транспонирования;

β — вектор весовых коэффициентов равновесия.

Предположение 1, описываемое уравнением (3), легко доказать, если положить, что вектор весовых коэффициентов равновесия β должен быть ортогонален вектору физических переменных величин x_t, характеризующих техническое состояние конкретного изделия на конкретном режиме работы.

В действительности в ходе испытаний новых изделий вектор x_t может и не находиться в равновесии по ряду причин, например таких, как интенсивное изменение численных значений структурных параметров, вызванных процессом приработки, который характеризуется быстрым изменением микрогеометрии деталей, сопряжений, из-за погрешностей измерений, случайных возмущений и т.д. Тем не менее, если считать, что предположение 1 справедливо, то для исправных изделий значения одномерной величины $z_t = \beta' x_t$, характеризующей отклонение значений вектора x_t от равновесного состояния, должны быть малыми и стремиться к нулю с ростом t.

Предположение 2. Если техническая система исправна, то может быть найден по меньшей мере один отличный от нуля ортогональный вектор весовых коэффициентов β, такой, что будет справедливо следующее равенство:

$$\beta' x_t = z_t;\ \ E\left[z_t\right] = 0;\ \ z_t \sim N\left(0,\ \sigma^2\right);\ \forall t > 0, \quad (4)$$

где $E[\ ]$ — символ математического ожидания.

Для доказательства выражения (4) примем, что отклонения переменной Δz_t от нуля малы и представляют совокупность случайных величин, генерируемых ошибками моделирования, погрешностями измерений, внешними неконтролируемыми возмущениями и т.д. Тогда аналитически процесс изменения Δz_t с течением дискретного времени, используя теорему Вольда [8], можно описать с помощью неоднородного разностного уравнения 1-го порядка:

$$z_t = z_{t-1} + \gamma_0 \varepsilon_t = z_{t-2} + \gamma_0 \varepsilon_t + \gamma_1 \varepsilon_{t-1} = \\ = \ldots = z_0 + \sum_{\tau=0}^{t} \gamma_\tau \varepsilon_{t-\tau}, \quad (5)$$

где ε — случайная величина, имеющая распределение и параметры белого шума.

Найдя математическое ожидание от выражения (5), несложно показать, что оно сходится к математическому ожиданию белого шума, которое стремится к нулю с ростом t:

$$E\left[z_t\right] = E\left[z_0\right] + E\left[\sum_{\tau=0}^{t} \gamma_\tau \varepsilon_{t-\tau}\right] = \\ = E\left[\beta' x_0\right] + E\left[\sum_{\tau=0}^{t} \gamma_\tau \varepsilon_{t-\tau}\right] = 0 + E\left[\sum_{\tau=0}^{t} \gamma_\tau \varepsilon_{t-\tau}\right]. \quad (6)$$

Справедливость выражения (5) с учетом принятых допущений позволяет ввести в рассмотрение следующее определение исправного состояния машиностроительных изделий.

Определение 1. Техническая система исправна (устойчива) в данном режиме в конкретный дискретный момент времени t, если изменение переменной Δz_t в этом режиме остается сколь угодно малым при любом достаточно малом изменении вектора Δx_t. Система исправна, если существует такой вектор β, ортогональный вектору x_t, что при любом $\varepsilon > 0$ для данного режима существует такое $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$, что $|\Delta z_t| < \varepsilon$, если $|\Delta x_t| < \delta \forall t > 0$.

Сформулированное определение относится к детерминированным системам и отличается от определения устойчивости решения дифференциального уравнения, характеризующего устойчивость систем согласно принципу Ляпунова [9]. Принимая во внимание то, что измерительная информация, получаемая в ходе приемосдаточных испытаний, представляет случайный процесс [3, 7, 10], распространим сформулированное определение на стохастические системы.

Определение 2. Техническая система, состояние которой изменяется во времени случайным образом, считается устойчиво исправной в данном режиме с вероятностью, равной единице, если изменение переменной Δz_t в этом режиме при заданных значениях вектора весовых коэффициентов β, ортогонального вектору x_t, с единичной вероятностью сколь угодно мало при любом достаточно малом изменении вектора Δx_t. При любом $\varepsilon > 0$ и заданных значениях β для данного режима существует такое $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$, что

$$\lim_{t->\infty} P\left(\sup\left(\left|\Delta z_t\right|\right) > \varepsilon\right) = 0 \quad \forall \sup_{t>t_0}\left(\Delta x_t\right) < \delta.$$

Из определений 1 и 2 следует, что для того чтобы система находилась в исправном состоянии в данном режиме работы, необходимо чтобы скалярное произведение вектора состояния и вектора весовых коэффициентов равновесия было равно нулю.

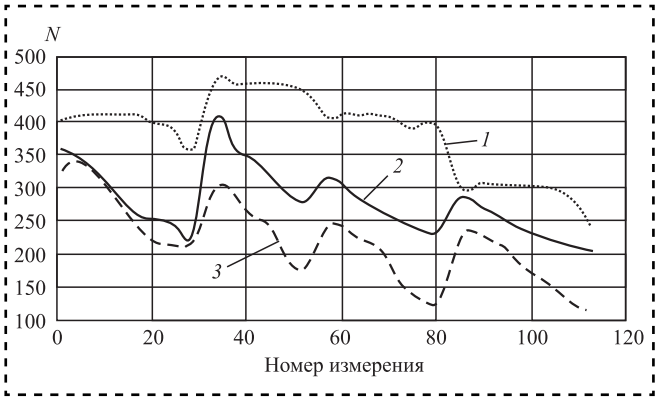


Рис. 2. Пример изменения значений диагностических *N* параметров ДВС 4Ч7.5/8.5:
1 — *H*, кПа; *2* — *ge*, кг/(кВт·ч); *3* — C_zH_y, млн$^{-1}$

В качестве примера использования предлагаемого критерия для оценки технического состояния изделий рассмотрим процесс изменения трех диагностических параметров двигателя 4Ч7.5/8.5, отражающих качество его регулировок и характеристик режима работы: давления воздуха во впускном коллекторе *H*, кПа; среднего эффективного удельного расхода топлива *ge*, кг/(кВт·ч); содержания C_zH_y (предельных и непредельных углеводородов) в отработавших газах, млн$^{-1}$ (рис. 2).

Первый этап формирования критерия сводится к определению численных значений параметров вектора коэффициентов равновесия β, используя, например, алгоритм, минимизирующий квадрат расстояний между истинными и оценочными значениями исследуемого вектора [3, 7]. Для рассматриваемого примера адекватной измерительной информацией признана векторная авторегрессионная модель коррекции ошибок:

$$\Delta x_t = \Pi_0 + \Pi x_{t-1} + \sum_{j=1}^{p-1} \Pi_j \Delta x_{t-j} + \varepsilon_t; \ \Pi = a\beta^{\mathrm{T}}, \quad (7)$$

где α — $n \times r$ матрица корректирующих коэффициентов;

$$r = 1;$$

$\varepsilon_t = (\varepsilon_{1t}, \ ..., \ \varepsilon_{nt})^{\mathrm{T}}$ — вектор ошибок оценивания (остатков);

$x_t = (H(t) \ ge(t) \ \mathrm{CH}(t) \ ge_t)^{\mathrm{T}}$ — вектор состояния системы;

$\Pi_0 = (2{,}7 \ 9{,}1 \ 4{,}0)^{\mathrm{T}}$ — вектор констант;

$\Pi_j = \alpha_{ik}(j)$; i; $k = 1, \ ..., \ n$; $j = 1, \ ..., \ p$ — матрицы коэффициентов.

Матрица $\Pi = \alpha\beta^{\mathrm{T}}$ имеет вид:

$$\Pi = \begin{bmatrix} -0{,}004 \\ (0{,}003) \\ 0{,}003 \\ (0{,}002) \\ -0{,}004 \\ (0{,}002) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0{,}333 & 0{,}996 & -416{,}612 \\ (0{,}174) & (0{,}220) & (60{,}761) \end{bmatrix} = \alpha\beta^{\mathrm{T}}. \quad (8)$$

Величины в скобках рядом с каждой оценкой в уравнении (8) означают стандартные ошибки оценок. Совместное решение (7) и (8) позволяет вычислить значения β:

$$\beta_{(1)} = \left[-0{,}33 \ \ 0{,}996 \ \ -416{,}612\right]^{\mathrm{T}}. \quad (9)$$

С учетом выражения (9) общий вид критерия (5), характеризующего техническое состояние изделия, примет вид:

$$z_t = -0{,}33H_t + 0{,}996ge_t - 416{,}612\mathrm{CH}_t. \quad (10)$$

Результат оценки равновесного состояния изделия при заданных значениях вектора β представлен на рис. 3.

Небольшие колебания функции $z[t]$, $t = 1, 2, 3, \ ...$ (рис. 3, *а*) вблизи нуля объясняются инструментальными погрешностями измерений, которые могут быть устранены, например, путем использования оптимальных адаптивных алгоритмов фильтрации работающих в условиях априорной неопределенности.

Хорошая сходимость теоретических и практических результатов является основанием для использования предлагаемого критерия в качестве показателя работоспособного состояния сложных изделий машиностроения. Основное преимущество использования предлагаемого критерия работоспособности, по сравнению с существующими, — анализ отклонений численных значений диагности-

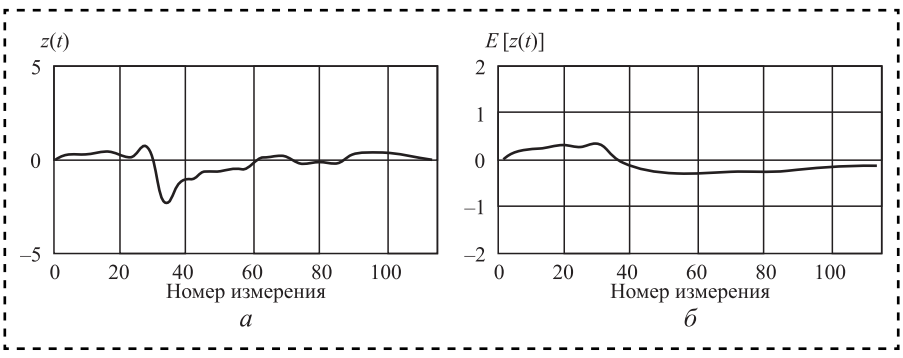


Рис. 3. Результаты оценки технического состояния ДВС:
а — *z*(*t*); *б* — *E*[*z*(*t*)]

ческих параметров изделий от равновесного устойчивого состояния позволит в режиме реального времени автоматизированных испытаний проводить оценку динамики технического состояния изделий в виде траектории, а не отдельного временного сечения, как это происходит в настоящее время. С математической точки зрения критерий технического состояния такого типа представляет собой уже не функцию от исследуемых параметров, а функционал от траектории (траекторий) переменных, описывающих техническое состояние системы. Последнее в будущем может быть использовано в качестве условия необходимости и достаточности при оценивании равновесных состояний.

Библиографический список

1. **Охтилев М.Ю., Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.

2. **Халиуллин Ф.Х., Ахметзянов И.Р.** Особенности составления диагностической матрицы Байеса при безразборной диагностике двигателей внутреннего сгорания // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 5 (47). С. 205—209.

3. **Pervukhina E., Osipov K., Rapatskiy Y.** Improvement of the acceptance test procedure for the external combustion engine after assembly by using the relationship between diagnostic parameters // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2011. Vol. 40. N 2. P. 171—175.

4. **Биргер И.А.** Техническая диагностика. М.: Машиностроение, 1978. 240 с.

5. **Mollenhauer K., Tschoeke H.** Handbook of diesel engine. Springel-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 636 p.

6. **Box G.E., Jenkins G.M., Reinsel G.C.** Time Series Analysis, Forecasting and Control. New Jersey: Prentice Hall, 1994. 598 p.

7. **Первухина Е.Л., Голикова В.В., Степанченко Т.Л.** Информационные технологии в задачах выявления неисправных машиностроительных изделий в ходе приемосдаточных испытаний после сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 11. С. 3—8.

8. **Scargle J.D.** Studies in astronomical time series analysis. I — Modeling random processes in the time domain // Astrophysical Journal Supplement Series, 1981. Vol. 45. P. 1—71.

9. **Бессекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. 767 с.

10. **Pervukhina E., Golikova V., Osipov K.** Defect identification of machine-building products during the course of acceptance tests // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2011. Vol. 39. N 5. P. 485—491.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел.: 8 (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 621.867.229.6

И.А. Авцинов, В.К. Битюков, *д-ра техн. наук,* **Н.В. Суханова,** *канд. техн. наук*
(Воронежский государственный университет инженерных технологий)
E-mail: Suhanovanv1971@mail.ru

К вопросу конструирования пневматических устройств для сортировки специфических штучных изделий

Разработаны методологические и научные основы распознавания и ориентирования штучных специфических изделий на тонкой газовой прослойке. Предложен принцип распознавания, основанный на использовании свойств тонкой газовой прослойки и несущей поверхности, который обеспечил создание ряда универсальных устройств, способных успешно решать задачи: контроля и сортировки (отбраковки) штучных специфических изделий по качеству поверхности, геометрическим размерам. На основании анализа существующих разработок предложены основы распознавания изделий на газовой прослойке с использованием различных рабочих поверхностей, которые легли в основу создания ряда новых сортирующих устройств, обладающих высоким уровнем гибкости.

There was developed methodological and scientific bases of recognition and orientation of a piece specific products on a thin gas layer. The principle of recognition, based on the use of the properties of the thin gas layer and the bearing surface there was proposed which provided the creation of a number of universal devices, capable to solve successfully tasks: control and sorting (rejection) piece specific products on surface quality, geometric size. Based on the analysis of existing research proposed the basics of recognition products on the gas layer with the use of different working surfaces, which formed the basis for the creation of a number of new sorting devices with a high level of flexibility.

Ключевые слова: специфические изделия, газовая несущая прослойка, классификация устройств, сортировка и выбраковка изделий, принцип распознавания.

Keywords: specific products, gas-bearing layer, device classification, sorting and culling of products, principle of recognition.

Некоторые детали, изделия, узлы приборостроения, машиностроения, химической и других отраслей промышленности обладают рядом специфических свойств: заниженными физико-механическими свойствами (хрупкость, малая жесткость и прочность, ломкость и т.п.); высокими фрикционными свойствами; спецификой опорных поверхностей (высокой чистотой обработки, завышенными санитарно-гигиеническими и эстетическими требованиями: свеженанесенные, сверхчистые и специфические покрытия и т.п.) (таблица).

Все виды изделий имеют широкий диапазон размеров и конфигураций их опорных поверхностей (рис. 1). На основании приведенного анализа изделий удалось систематизировать их по конфигурации (рис. 2).

Большинство операций манипулирования специфическими штучными деталями (изделиями) выполняется вручную, так как существуют определенные сложности применения специальных устройств.

Одно из устройств для контактной оценки шероховатости опорной поверхности изделий приведено на рис. 3. Оно содержит корпус *1*, воздушную камеру *2* с верхней крышкой *3*, шток *4*, фиксаторы *5*, дополнительную пружину *6*, датчик скорости линейного перемещения *7*. Элемент *9* содержит эластичный кольцевой выступ *10* с армированной металлом поверхностью *11* [А.с. 526771 СССР,

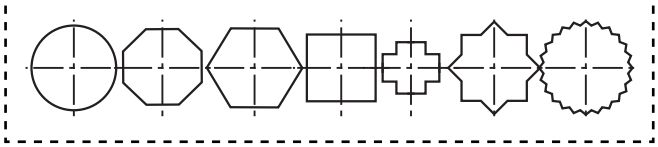
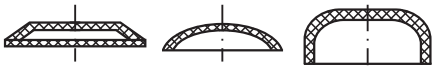
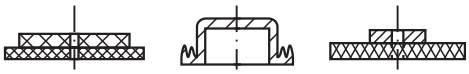
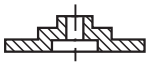
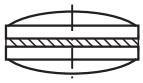
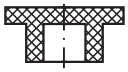
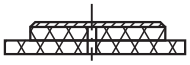


Рис. 1. Опорные поверхности изделий

Характерные специфические типы деталей (изделий)

Специфические изделия	Свойства, особенности опорной поверхности
Вогнутые, выпуклые линзы	Хрупкость, ломкость; высокая чистота обработки, завышенные санитарно-гигиенические требования
 Защитные детали из стекла, пластмасс	Хрупкость, ломкость
 Зубчатые шестерни	Высокая чистота обработки
Зеркала для медицинских приборов	Хрупкость, ломкость; высокая чистота обработки, завышенные санитарно-гигиенические требования
 Сигнальная арматура	Хрупкость, ломкость
 Склеенные половинки линз	Высокая чистота обработки; свеженанесенное покрытие
 Резиновая пробка	Высокая фрикционность
Фильтрующие элементы	Высокая фрикционность; завышенные санитарно-гигиенические требования
 Хрупкое основание с графитовым покрытием	Хрупкость, ломкость; абразивное покрытие
Абразивный круг	Высокая фрикционность

М. Кл.[2] G 01 B 13/22. Устройство для оценки качества обработки поверхности / А.И. Свириденок, И.М. Золотухин, В.М. Переплетчиков, В.А. Граматчиков, Л.Д. Тарасенко // Опубл. 30.08.76. Бюл. № 32].

Устройство работает следующим образом. Шток *4* вместе с верхней крышкой *3* камеры *2* перемещают до срабатывания фиксаторов *5*. Устройство устанавливают контактным элементом на контролируемую поверхность *8* и осво-

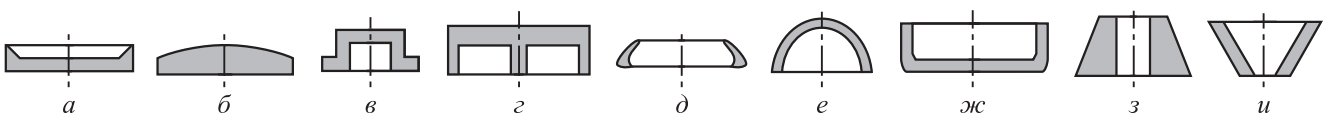


Рис. 2. Типы специфических штучных изделий. Колпачковый подтип:
а — вогнутый; *б* — выпуклый; *в* — низкий; *г* — фигурный; *д* — кольцевой низкий; *е* — кольцевой; *ж* — чашеобразный; *з* — конусный; *и* — профильный

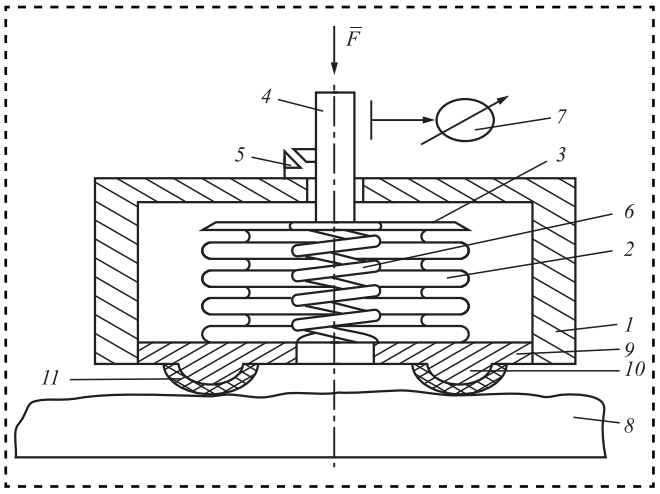


Рис. 3. Устройство для оценки качества обработки рабочей поверхности:
1 — корпус; *2* — воздушная камера; *3* — верхняя крышка; *4* — шток; *5* — фиксатор; *6* — пружина; *7* — датчик скорости линейного перемещения; *8* — контролируемая поверхность; *9* — элемент; *10* — выступ; *11* — армированная поверхность

бождаются фиксаторы *5*. Воздушная полость камеры *2*, выполненной в виде сильфона, начинает расширяться. Воздух поступает в полость через зазоры, образованные между поверхностью *8* и выступом *10* элемента *9*. По скорости перемещения штока *4*, измеряемой датчиком *7*, судят о степени шероховатости контролируемой поверхности *8*.

Одно из условий эффективной работы предприятия при постоянном изменении ассортимента выпускаемой продукции — гибкость производственного оборудования. Это обстоятельство определяет потребность в разработке принципиально новых технологических устройств автоматического действия для сортировки и контроля качества изделий [1, 2].

Один из вариантов решения поставленных задач — использование эффектов, возникающих в тонкой газовой несущей прослойке (ТГНП), создаваемой между рабочей поверхностью автоматического сортирующе-ориентирующего устройства (АСОУ) и опорной поверхностью транспортируемого изделия, а также создание оборудования, использующего ТГНП в качестве транспортирующего и распознающего элемента конструкции.

Проблема сортировки и выбраковки изделий на воздушной прослойке сводится к изучению истечения газа через сопла под изделие и движения газа между двумя жесткими поверхностями: опорная изделия — несущая устройства. Вопросы распределения давления и определения главного вектора сил обычно решают исходя из уравнений движения вязких сжимаемых жидкостей с использованием уравнений неразрывности, состояния и энергии. Полученные результаты легли в основу разработки нового метода распознавания по обобщенному критерию (удельная нагрузка), на основании чего получены два новых критерия сортировки (площадь опорной поверхности изделия и ее масса). Доказано, что газовая прослойка обладает высокой чувствительностью к изменению характерных параметров изделий, т.е. способна распознавать незначительное их изменение [2].

Идея метода заключается в следующем. На движущуюся рабочую поверхность АСОУ поступает поток изделий, для которых необходимо выполнить первичное пассивное ориентирование (сортировку, выбраковку, классификацию) с разделением на несколько потоков. Для этого движущаяся рабочая поверхность АСОУ полностью перфорирована соплами, создающими над ней ТГНП с направлением движения газа, независимым от перемещения рабочей поверхности. В результате этого, при различном характере расположения изделий на рабочей поверхности устройства или обладающих различной массой, одни перемещаются совместно с ней, а другие "всплывают" на ТГНП и уносятся в ином направлении. Операция "всплытие" характеризуется отсутствием механического контакта между изделием и рабочей поверхностью оборудования, что исключает их взаимодействие.

Системы "изделие — газовая прослойка — рабочая поверхность оборудования — пневмокамера" влияют на функциональные возможности предлагаемых устройств.

Различные устройства и оборудование с ТГНП выполняют операции с широким диапазоном типоразмеров изделий. Форма рабочей поверхности устройств отличается по геометрическому признаку и выполняется в виде разнообразных геометрических фигур: плоскости, параболоида, цилиндра, конуса и их комбинированных вариантов с дополнительным устройством (например, кольцевым буртиком, камерой, как внутри рабочей поверхности, так и поверх нее). Также рабочие поверхности делятся по подвижным признакам: подвижная и неподвижная; по виду движения: колебательного, поступательного и вращательного типа [3].

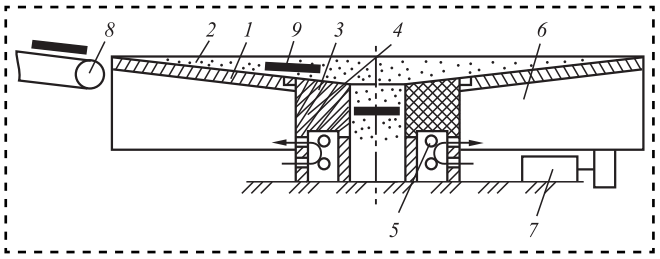


Рис. 4. Сортировка по качеству обработки поверхности: *1* — конус; *2*, *4* — сопло; *3* — улавливатель; *5* — канал; *6* — пневмокамера; *7* — привод; *8* — транспортер; *9* — изделие

Сортирующее устройство, представленное на рис. 4, содержит усеченный конус *1* с наклонными соплами *2*, неподвижный полый улавливатель *3* с наклонными соплами *4*. В нижней части улавливателя *3* расположены каналы *5*, которые с помощью пневмокамеры *6* связаны с соплами *2* и *4*. Пневмокамера *6* жестко связана с конусом *1* и кинематически с приводом вращения *7*. Изделия транспортером *8* поштучно подаются во внутреннюю полость конуса *1*, вращающегося от привода *7*. Сжатый воздух подается в пневмокамеру *6* через каналы *5*. Истекая из сопел *2* и *4*, воздух создает воздушную прослойку толщиной *h* под изделием *9*. Если качество поверхности изделия соответствует заданным требованиям, под изделием образуется воздушная прослойка, достаточная для "всплытия". После "всплытия" изделие *9* смещается к центру, попадая в зону действия сопел *4* улавливателя *3* и движется вниз. Если поверхность изделия не соответствует заданным требованиям, т. е. отклонение шероховатости формы превышает толщину воздушной прослойки *h*, то оно не "всплывает" и, вращаясь вместе с конусом, сбрасывается центробежной силой [А.с. 1348003 СССР, Кл. В 07 С 5/04. Устройство для сортировки изделий по качеству поверхности / И.А. Авцинов, В.К. Битюков, Г.В. Попов. Опубл. 30.10.87. Бюл. № 40].

На процесс всплытия изделия на воздушной прослойке значительно влияет зазор между несущей поверхностью оборудования по образующей конуса и опорной поверхностью изделия [2]. Чем больше данный зазор, тем больше требуется воздуха, подаваемого под изделия для "всплытия". За счет этого на одном и том же участке несущей поверхности устройства в виде конуса при неизменном расходе воздуха, подаваемого в пневмокамеру, изделия, имеющие меньшие размеры и, соответственно, меньший зазор между несущей поверхностью и изделием, будут "всплывать" на воздушной прослойке. Изделия большего размера и имеющие большой зазор будут совершать "посадку" на несущую поверхность, даже если они имеют такую же удельную нагрузку, как и первые. Поэтому сортируемые изделия при неизменном расходе воздуха, подаваемого в пневмокамеру, будут совершать "посадку" на несущую поверхность конуса на различном расстоянии от его вершины: меньшего размера — ближе к вершине, а большего — дальше. Данный принцип лег в основу создания ряда устройств для сортировки и выбраковки штучных изделий.

Устройство для сортировки по размеру на несколько потоков представлено на рис. 5 и включает средство сортировки *1*, выполненное в виде вогнутого диска, выполненного с возможностью вращения относительно вертикальной оси. Под диском установлена неподвижная пневмокамера *2*, обеспечивающая подачу сжатого воздуха под изделия *3* через перфорированную поверхность *1*. К основанию диска *1* примыкает устройство поштучной загрузки *4* и принимающие лотки (улавливатели) *5*, которые могут перемещаться относительно боковой поверхности средства сортировки. Устройство работает следующим образом. В пневмокамеру *2* подается сжатый воздух. По транспортеру *4* на средство сортировки поштучно подаются ориентированные изделия одного размерного ряда (одного конструктивного исполнения, но с пропорционально изменяющимися геометрическими размерами).

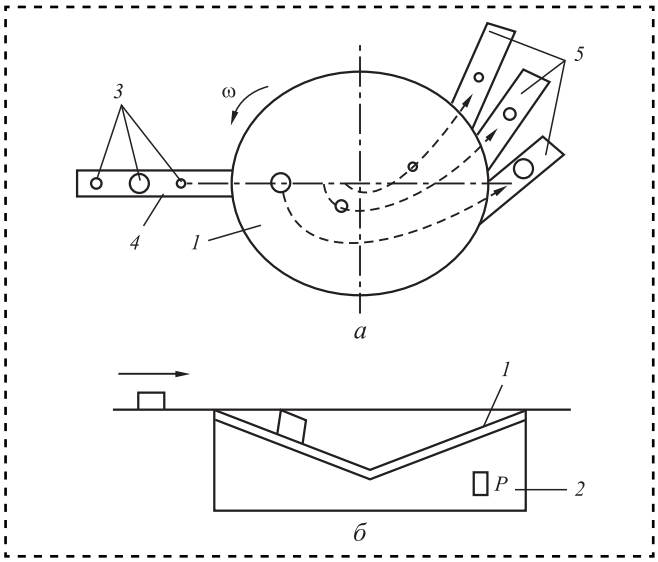


Рис. 5. Активная ориентация и сортировка по размеру: *а* — общий вид устройства; *б* — вид сбоку; *1* — диск; *2* — пневмокамера; *3* — изделия; *4* — устройство поштучной загрузки; *5* — улавливатели

Истекая из перфорации несущей поверхности *1*, сжатый воздух создает под изделиями воздушную прослойку. Диск *1* вращается относительно вертикальной оси от привода. Вращение несущей поверхности *1* на изделия не передается, и они под действием составляющей силы тяжести перемещаются вдоль вогнутого диска к его центру.

При движении предмета вдоль образующих конуса зазор между изделием и несущей поверхностью постоянно увеличивается за счет уменьшения радиуса кривизны конуса. Как только зазор будет настолько велик, что поле давления в газовой прослойке окажется недостаточным для организации процесса всплытия, изделие осуществит "посадку" на конус. Данный процесс характеризуется механическим контактом несущей поверхности *1* с предметом производства, который начинает вращаться вместе с конусом, так как на него действует центробежная сила, выносящая изделие на лоток *5*.

Различные изделия будут совершать "посадку" строго в определенных местах вдоль образующей конуса. В связи с этим их траектории движения при удалении с диска будут различны, т.е. сортируемые изделия соскальзывают с конуса в различных местах его основания и попадают в соответствующие приемные лотки *5*. В первом лотке по направлению поворота диска будут находиться самые большие из них по геометрическим размерам, в последующих лотках — с пропорционально уменьшающимися указанными характеристиками. Во время операции сортировки между изделием и несущей поверхностью диска постоянно присутствует газовая смазка, что сводит к минимуму их механический контакт. Причем чем меньше разница между диаметрами изделий, входящих в один размерный ряд, тем больше должен быть угол конусности (вогнутости) диска, так как с его увеличением возрастает чувствительность средства сортировки. Таким образом, зная все изделия в размерном ряду, можно подобрать угол конусности диска, необходимый для их сортировки. Все выше сказанное в полной мере относится и к параметру "удельная нагрузка" [Пат. 2147942 РФ С1. В 07 В 7/08. Устройство для сортировки изделий / И.А. Авцинов, В.К. Битюков, Д.Ю. Новиков; заявл. 07.06.99; опубл. 27.04.2000, Бюл. № 12].

Использование газовой смазки позволяет сортировать и выбраковывать специфические изделия.

Разрабатываемые устройства на базе "изделие — рабочая поверхность — пневмокамера" обладают следующими преимуществами: 1) универсальностью, так как могут манипулировать разнообразными типоразмерами изделий без изменения конструкции; 2) способностью к переналадке при переходе от одних типоразмеров изделий на другие за счет изменения расхода сжатого воздуха и скорости движения рабочей поверхности, что может быть реализовано в автоматическом режиме; 3) многофункциональностью, так как на каждом из устройств реализуется несколько операций; 4) простотой конструкции; 5) надежностью; 6) процесс распознавания реализуется в потоке деталей (изделий) практически мгновенно [2]. Кроме того, ТГНП является:

— не только несущим элементом, но и распознающим, с чувствительностью, зависящей от диаметра газоподводящих отверстий;

— газовой смазкой, позволяющей исключить или значительно снизить жесткий фрикционный контакт рабочей поверхности устройства с опорной поверхностью предмета производства, что позволяет использовать предложенные устройства для изделий со специфическими свойствами;

— хладо- или теплоагентом, позволяющим реализовывать разнообразные термические процессы.

Полученные результаты исследований могут быть использованы при проектировании гибких пневматических сортирующих устройств различных типов для приборостроительных, машиностроительных и других предприятий, к которым предъявляют повышенные требования по производственной гигиене, санитарии и требуется манипулировать специфическими деталями (изделиями).

Анализ взаимосвязи конструктивных параметров предлагаемых устройств с динамическими характеристиками позволит разработать алгоритмы их проектирования.

Библиографический список

1. **Авцинов И.А., Битюков В.К., Маликов Д.Ю.** Анализ специфических изделий и конструкций устройств для их манипулирования // Вестник ВГУИТ, 2013. № 4. С. 73—78.

2. **Авцинов И.А., Битюков В.К.** Роботизация химико-технологических процессов и устройства с несуще-распознающей тонкой газовой прослойкой. Воронеж: ВГТА, 2002. 372 с.

3. **Авцинов И.А., Кристаль М.Г., Маликов Д.Ю.** Классификация устройств с газовой несущей прослойкой // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2014. № 2. С. 9—11.

УДК 621.43.052

П.А. Болоев, *д-р техн. наук*
(Бурятский государственный университет, г. Улан-Удэ),
В.П. Друзьянова, *д-р техн. наук,* **Н.В. Петров,** *канд. техн. наук,* **С.И. Григорьев**
(Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск)
E-mail: wangod7596@gmail.com

Экспериментальный стенд для исследования энергетической установки с биогазовым ДВС

Изучен биогаз, полученный путем переработки навоза КРС, обогащенный и компримированный до уровня природного газа. Приведена принципиальная схема экспериментального стенда и описаны измерительные приборы для исследования автомобильного биогазового ДВС.

This article describes the biogas obtained by processing cattle manure. The resulting biogas was enriched and compressed to the level of natural gas. A schematic diagram of the experimental stand for the study of automotive biogas engine is given. A description of the measuring instruments used in this experimental stand. In this paper, the task is to create an automated test bench for the study of the workflow of the engine, which is adapted to work on biogas.

Ключевые слова: биогаз, экспериментальный стенд, датчик, измерительный прибор.

Keywords: biogas, experimental stand, sensor, measuring device.

Биогаз — альтернативный источник энергии, используемый в качестве моторного топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием.

Важный этап создания биогазового двигателя — экспериментальное исследование. На этом этапе проверяется адекватность математических моделей, применяемых для расчетного исследования процессов в двигателе, а также основные расчетные результаты, полученные с их помощью, выполняется доводка рабочего процесса биогазового ДВС.

В настоящее время накоплен значительный опыт создания специальных стендов для доводки газовых двигателей [1—3]. Такие стенды оборудованы классическими системами топливоподачи и зажигания, которые дают возможность ручного управления параметрами.

Для выбора и обоснования параметров рабочего процесса автоматизированного стенда необходим полный комплекс измерительной аппаратуры, удовлетворяющий следующим требованиям:

— работа на бензине и биогазе;

— управление составом рабочей смеси, как при работе на бензине, так и на биогазе;

— принудительное управление величиной угла опережения зажигания (УОЗ);

— измерение момента сопротивления на валу двигателя во всем диапазоне изменения частоты вращения (n = 800...5590 мин$^{-1}$);

— регистрация давления в цилиндре двигателя (индикаторная диаграмма) с последующим определением индикаторных показателей;

— регистрация расхода воздуха и топлива;

— поддержание стабильного температурного режима двигателя.

Микропроцессорные системы управления, которыми оснащены современные двигатели, не позволяют изменять коэффициент избытка воздуха и УОЗ в ручном режиме. Поэтому поставлена задача дополнительно разработать ряд устройств, которые позволят изменять количество топлива и УОЗ в широком диапазоне, не изменяя характеристических карт микропроцессорной системы управления.

В качестве базы для создания биогазового ДВС выбран серийно выпускаемый заводом "АвтоЗАЗ-Мотор" ПАО "ЗАЗ" и устанав-

ливаемый на автомобили ZAZ Sens двигатель МеМЗ-307 (основное топливо — бензин АИ-95). В серийном исполнении этот двигатель имеет следующие конструктивные и эксплуатационные характеристики: диаметр цилиндра — 75 мм; ход поршня — 73,5 мм; степень сжатия 9,8; эффективная мощность — 51,5 кВт при частоте вращения коленчатого вала n = 5200 мин$^{-1}$. Микропроцессорная система управления двигателем — "Микас 10.3".

При переводе данного двигателя на биогаз степень сжатия была увеличена до ε = 13,5.

Структурная схема стенда приведена на рис. 1. Для возможности плавного изменения

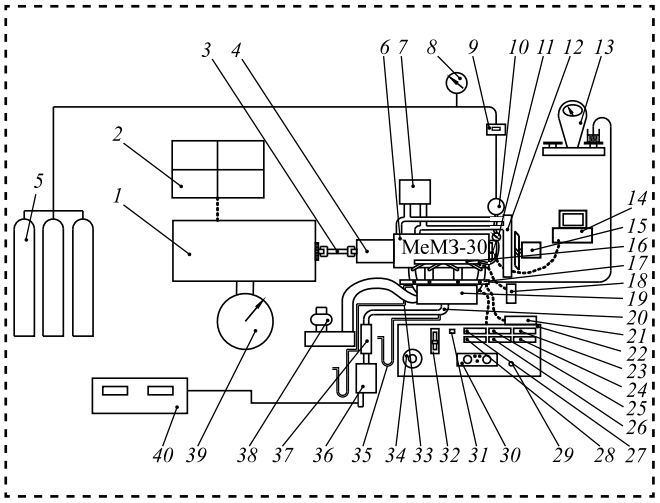


Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда на базе автомобильного биогазового ДВС:

1 — балансирная машина; *2* — набор сопротивлений; *3* — карданная передача; *4* — коробка передач; *5* — баллоны с биогазом; *6* — двигатель МеМЗ-307; *7* — водяной теплообменник; *8* — манометр; *9* — расходомер газа; *10* — двухступенчатый газовый редуктор; *11* — манометр; *12* — радиатор двигателя; *13* — весы для измерения расхода жидкого топлива; *14* — измерительно-вычислительный комплекс; *15* — вентилятор; *16* — газовая рампа с форсунками; *17* — бензиновая рампа с форсунками; *18* — ЭБУ газовой системы; *19* — впускной коллектор; *20* — выпускной коллектор; *21* — ЭБУ двигателя; *22* — пульт управления; *23* — прибор для измерения температуры охлаждающей жидкости; *24* — прибор для измерения температуры масла; *25* — прибор для измерения температуры ОГ; *26* — прибор для измерения давления масла в системе смазки; *27* — прибор для измерения частоты вращения коленчатого вала; *28* — прибор для измерения частоты вращения ротора балансирной машины; *29* — замок зажигания; *30* — панель приборов автомобиля; *31* — переключатель вида топлива; *32* — рукоятка для управления дроссельной заслонкой; *33* — устройство для изменения сопротивления впускной системы; *34* — устройство для управления нагрузкой на ДВС; *35* — прибор для измерения сопротивления выпускной системы; *36* — глушитель шума; *37* — резонатор; *38* — расходомер воздуха; *39* — весовое устройство для измерения нагрузки; *40* — газоанализатор

момента сопротивления на валу двигателя при проведении испытаний стенд оборудован электрическим нагрузочным устройством МПБ-100 1 (см. рис. 1). Для передачи мощности от двигателя к балансирной машине используется механическая коробка передач ВАЗ 2103, которая позволяет работать в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя, а также карданной передачи. Стенд оборудован дополнительным воздушным вентилятором *15*, а также дополнительным теплообменником *7*, при помощи которых можно моделировать температурный режим максимально приближенный к реальным условиям эксплуатации. С той же целью на стенде установлены глушитель шума и резонатор от штатной системы выпуска отработавших газов автомобиля ZAZ Sens. Для изменения сопротивления выпускной системы предусмотрена заслонка *33*.

Для исследования работы двигателя на альтернативных газообразных видах топлива стенд оборудован газовой системой четвертого поколения: каскад баллонов с запасом газа *5*, двухступенчатый газовый редуктор *10*, магистраль высокого и низкого давления, газовая рампа с форсунками *16*, блок управления газовой системой *18*. Для выбора вида топлива на панели пульта управления *22* предусмотрен переключатель *31*.

Исследования в области эргономики рабочего места оператора показывают, что наибольшую информативность для человека несет визуальное наблюдение за низкочастотным процессом, поэтому в качестве регистрирующих приборов использовали демпфированные стрелочные измерители (*8*, *11*, *13*, *30*, *39*), а также светоизлучающие цифровые индикаторы (*23—28*) [5].

Основная задача системы автоматического сбора данных (САСД) — обеспечение исследования набором данных, характеризующих ход протекания эксперимента. Для экспериментов различного рода необходимо охватить достаточно много параметров. А построение многоканальной измерительной системы для сигналов различного рода — трудоемкая и дорогостоящая работа. Поэтому, используя опыт, полученный при построении автоматизированной системы исследования двигателей [4], для построения САСД использовали альтернативные функции электронного блока управления (ЭБУ).

На двигателе МеМЗ-307 установлен ЭБУ "Микас 10.3", который кроме основной функции имеет встроенные функции мониторинга и диагностики. Используя ПК со специальным программным обеспечением (ПО) и устройство связи (K-line адаптер), проводится опрос ЭБУ, получая текущие значения сигналов датчиков и управляющих воздействий. ПО позволяет использовать и функцию диагностики для быстрого поиска и устранения неисправностей.

Система управления впрыском газа использует ЭБУ "OMVL", который также имеет функцию мониторинга и подключается к ПК посредством специального OMVL-адаптера.

Параметры, отслеживаемые с помощью САСД:

— частота вращения коленчатого вала двигателя, мин$^{-1}$;

— положение дроссельной заслонки, %;

— угол опережения зажигания, град. п.к.в.;

— длительность импульса впрыска топлива, мс;

— массовый расход воздуха, кг/ч;

— давление во впускном коллекторе, мм. рт. ст.;

— температура охлаждающей жидкости, °С;

— температура воздуха, °С;

— расчетный часовой расход топлива, л/ч;

— расчетный путевой расход топлива, л/100 км;

— скорость автомобиля, км/ч;

— напряжение бортовой сети, В;

— фактическое положение шагового мотора РХХ;

— напряжение на датчике кислорода, В;

— время накопления импульса зажигания, мс;

— температура газа в редукторе, °С;

— температура газа в рампе, °С;

— давление газа в рампе, Па;

— время открытия газовой форсунки, мс.

Частота опроса ЭБУ составляет 5 Гц, что, в связи с инерционностью двигателя, вполне достаточно для записи перечисленных параметров не только для статических, но и для переходных режимов.

Задача измерительного комплекса — регистрация быстропротекающих процессов ДВС. В диагностических целях для этого в основном используют осциллограф, но для исследования ДВС, в особенности на переходных режимах, требуются наборы статистических данных подряд записанных циклов. Количество требуемых параметров зачастую превышает количество каналов осциллографов общего применения.

Один из таких параметров — кривая изменения давления в цилиндре (индикаторная диаграмма), которая дает наглядное представление о протекании параметров состояния рабочего тела в течение цикла. Для обработки индикаторная диаграмма должна сопровождаться различными метками синхронизации: верхняя мертвая точка (ВМТ), нижняя мертвая точка (НМТ), момент зажигания (МЗ) и т.п. Поэтому для разработки измерительного комплекса использовали многоканальное устройство ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в персональных компьютерах на базе платы L-783 (ООО "Л Кард").

Технические характеристики платы L-783:

— интерфейс связи PCI;

— 16 дифференциальных каналов или 32 канала с общей землей для аналогового ввода;

— максимальная частота работы 12-битного АЦП — 2857(3300) кГц;

— два входа для внешней синхронизации при вводе сигнала;

— порт цифрового ввода/вывода, имеющий 16 входных и 16 выходных линий;

— диапазоны входного сигнала ±5, ±2,5, ±1,25, ±0,625 В.

Структурная схема измерительного комплекса представлена на рис. 2.

Сигналы штатных датчиков ЭСУД и пьезоэлектрического датчика давления (ПДД) через усилитель заряда поступают на блок согласования, в котором происходит преобразование и нормирование сигналов по уровню во избежание превышения предельно допустимых

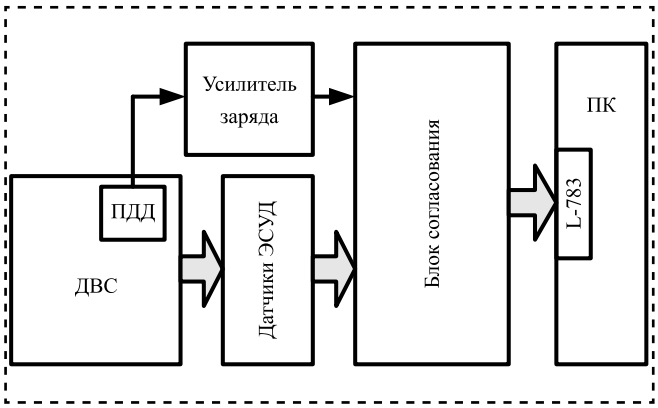


Рис. 2. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса

значений по входу устройства ввода-вывода. Далее посредством АЦП сигналы оцифровываются и поступают в компьютер. В качестве программного обеспечения ПК используется программа Power Graph, которая имеет расширенные функции предварительной настройки. Это позволяет настроить канал измерения давления на отображения сигнала в мегапаскалях для адекватного восприятия получаемых данных во время эксперимента.

Для установки датчика давления в первом цилиндре головки цилиндров выполнен специальный канал. Обеспечение стабильного температурного режима датчика достигается принудительным водяным охлаждением.

Для работы ДВС на обедненных смесях, а также для доводки параметров рабочего процесса двигателя при работе на газовом топливе необходимо обеспечить возможность принудительного управления количеством топлива в составе топливовоздушной смеси и УОЗ. Для этого на стенде задействована система управления двигателем (рис. 3).

Применение ЭБУ не дает возможности управлять бензовоздушной смесью в ручном режиме, а изменение программы блока, во-первых, приводит к нарушению заводских настроек, во-вторых, не позволяет изменять коэффициент избытка воздуха динамически, непосредственно во время эксперимента. Поэтому разработано устройство, в задачи которого входят: измерение текущего времени впрыска, динамическое изменение времени впрыска на заданную величину, отображение информации о текущих параметрах. Устройство включено в разрыв цепи управления клапанами форсунок и обеспечивает дискретное изменение текущего времени впрыска в пределах ±20 %.

Для нормального функционирования устройства управления топливоподачей необходимо использовать имитатор датчика кислорода, чтобы исключить коррекцию электронного блока по сигналу обратной связи с датчика кислорода. Имитатор отключает датчик и на вход ЭБУ подает сигнал, что коэффициент избытка воздуха находится в пределах единицы.

Контроллер газовой системы OMVL корректирует время открытия газовых форсунок по сигналу датчика давления в газовой рампе (ДДГ). Принудительное управление газовоздушной смесью обеспечивается на двух уровнях: на первом — установкой необходимого давления в газовой рампе при помощи редуктора; на втором — отключением штатного ДДГ и подачей сигнала с имитатора датчика давления на вход ЭБУ. Такой способ управления охватывает широкий диапазон изменения

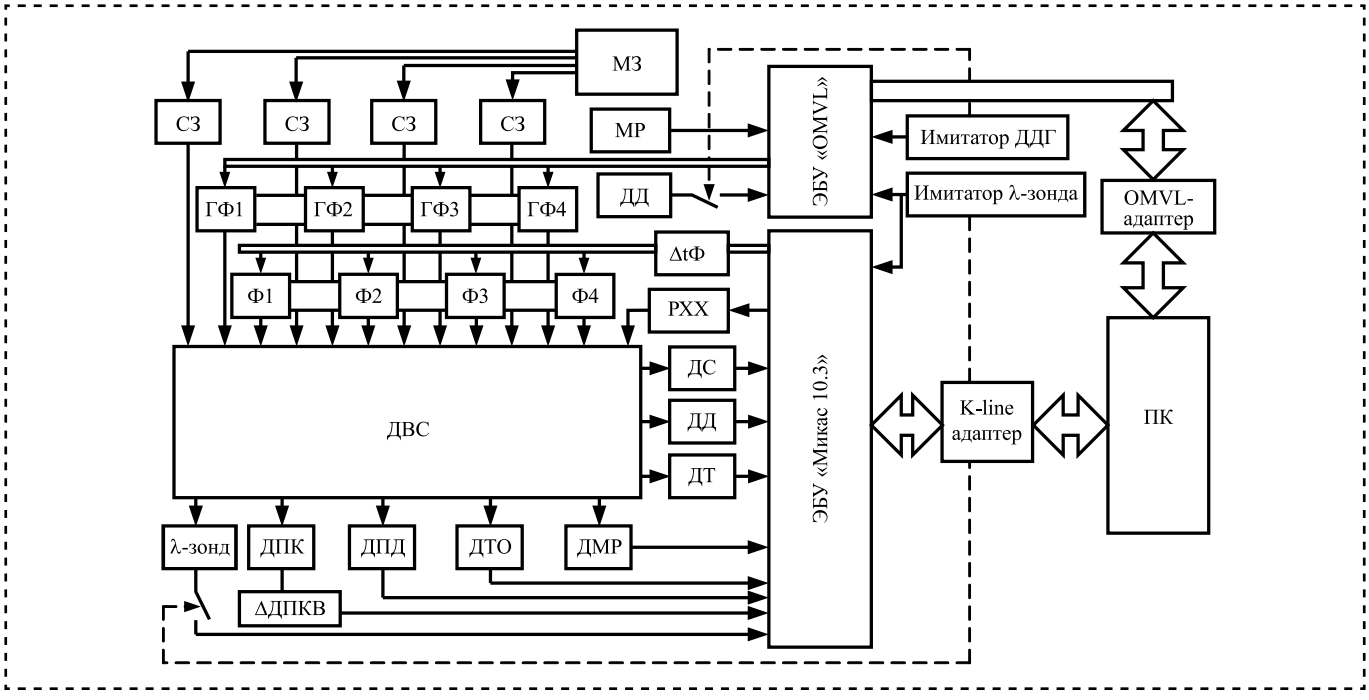


Рис. 3. Система управления биогазовым ДВС на стенде

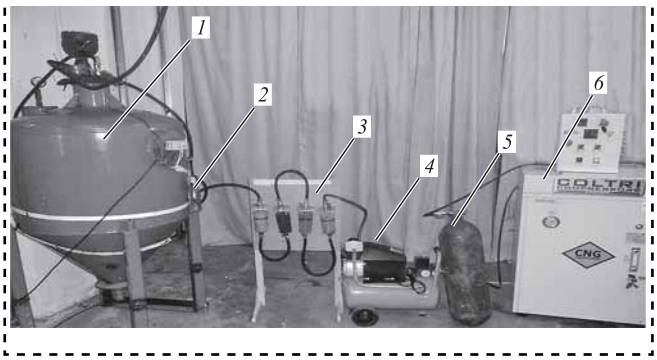


Рис. 4. Технологическая схема автобиогазовой заправки: *1* — биогазовый реактор; *2* — барботажная камера; *3* — сепаратор; *4* — компрессор низкого давления КПП-230-24; *5* — рессивер; *6* — компрессор высокого давления МСН-10

коэффициента избытка воздуха и позволяет оперативно воздействовать на него во время эксперимента.

Синхронизация работы двигателя и ЭСУД проводится по сигналу датчика положения коленчатого вала (ДПКВ). Из всех управляющих воздействий электронного блока только момент зажигания имеет жесткую привязку к положению КВ. Используя этот фактор, разработали вариатор сигнала ДПКВ (ΔДПКВ), который включается в разрыв цепи датчика и позволяет смещать сигнал ДПКВ на заданный угол.

При получении топлива для проведения экспериментальных исследований задействована биогазовая заправка (рис. 4).

Биогаз из реактора *1* объемом 0,7 м^3 попадает в барботажную камеру *2*, в которой очищается от механических примесей, сероводорода и части углекислого газа. Далее топливо попадает в сепаратор, состоящий из четырех последовательно расположенных фильтров со следующими наполнителями: древесная стружка, активированный уголь, металлическая стружка, природный цеолит. Данный сепаратор удаляет из биогаза водяные пары, а также большую часть CO_2. Меняя толщину фильтрующего слоя в угольном и цеолитовом фильтрах, можно получать биогаз с содержанием CO_2 от 7 до 50 % по объему. Далее биогаз с помощью заправочной установки МСН-10 закачивается в расходные баллоны под давлением до 20 МПа.

Заключение

Создан стенд для исследования автомобильного биогазового ДВС. Стенд оснащен полным комплексом измерительной аппаратуры для определения индикаторных и эффективных показателей двигателя.

Разработана автоматизированная система управления двигателем на стенде, позволяющая по команде с поста управления изменять параметры подачи топлива и угол опережения зажигания.

Применение биогаза в качестве топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания позволит сохранить природные ресурсы и улучшить экологическое и экономическое состояние как Республики Саха (Якутия), так и России в целом.

Библиографический список

1. **Бганцев В.Н., Левтеров А.М., Мараховский В.П.** Газовый двигатель на базе четырехтактного дизеля общего назначения // Мир техники и технологий. Техно+. 2003. № 10. 92 с.

2. **Захарчук В.І., Сітовський О.П., Козачук І.С.** Розрахунково-експериментальні дослідження газового двигуна, переобладнаного з дизеля // Автомобільний транспорт. Харьків: ХНАДУ. 2005. Вип. 16. С. 276—278.

3. **Экспериментальная** установка для доводки систем зажигания и управления газовым двигателем с искровым зажиганием 6Ч 13/14 / В.А. Богомолов и др. // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. 2005. № 4 (22). С. 42—45.

4. **Новая** автоматизированная система исследования и диагностирования автотракторных двигателей / Ф.И. Абрамчук и др. // Автомобильный транспорт. Харьков: ХНАДУ. 2005. Вып. 17. С. 28—34.

5. **Мунипов В.М., Зинченко В.П.** Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды. М.: Логос, 2001. 356 с.

УДК 621.8:62.192

М.М. Ахмедпашаев, Г.Х. Ирзаев, *канд. техн. наук,* **М.У. Ахмедпашаев,** *д-р техн. наук*
(Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала)
E-mail: irzajev@mail.ru

Оценка технического ресурса типовых деталей трибосопряжений погружного насоса

Предложена аналитическая оценка технического ресурса и запаса прочности наиболее изнашиваемых деталей трибосопряжения погружного насоса: пары трения винт—обойма, подшипника качения, зубчатой передачи. Методики расчета могут быть использованы для объективного назначения времени эксплуатации погружных насосов с учетом отказоустойчивости и износа отдельных типовых деталей агрегата.

The analytical estimation of a technical resource and safety factor of such most worn out details of a tribojunction of the submersible pump as a friction pair screw—holder, a rolling bearing, a gear transmission is offered. Calculation methods can be used to objectively assign the operating time of submersible pumps, taking into account fault tolerance and wear of individual typical parts of the unit.

Ключевые слова: детали трибосопряжения, технический ресурс, погружной насос, износостойкость, пара винт—обойма, подшипник качения, зубчатая передача, трение.

Keywords: details of tribocoupling, technical resource, submersible pump, wear resistance, screw—holder pair, rolling bearing, gearing, friction.

Введение

Одна из основных проблем нефтедобывающей отрасли — повышение надежности и технического ресурса работы погружных насосов, работающих в скважинах со сложными условиями эксплуатации. При работе погружного агрегата в агрессивной среде, содержащей абразивные материалы, процессы пластической деформации поверхностных слоев трущихся деталей протекают более интенсивно, при этом деформируются более глубокие слои поверхности трения.

Детали трибосопряжений глубинных насосов могут потерять работоспособность при возникновении различных дефектов и износа деталей. К наиболее изнашиваемым деталям трибосопряжений можно отнести пару винт—обойма, подшипники качения, зубчатые колеса и др. Достоверная оценка технического ресурса этих деталей позволяет прогнозировать длительность эксплуатации и отказоустойчивость погружных насосов, а учет неравномерности износа — предотвратить проектирование и изготовление деталей трибосопряжений с излишне высокими показателями ресурса работы, увеличивающими затраты не только на приобретение насоса, но и на его поддержку в эксплуатации.

Оценка технического ресурса пары трибосопряжения винт—обойма. Винт погружного насоса, работая в трибосопряжении с обоймой, совершает планетарное движение и создает необходимое разрежение в насосно-компрессорной системе. Винт с однозаходной хромированной поверхностью левого направления и обойма (стальная гильза, заполненная резиной, внутренняя полость которой профилирована в виде двухзаходной винтовой поверхности левого вращения) имеют коррозионно-стойкое исполнение пары. Однако эксплуатация пары трения может сопровождаться преждевременным износом или отказом, например, при перекачке нефти, содержащей абразивные частицы.

Условие расчета пары винт—обойма:

$$T \geqslant [T],$$

где T — расчетный технический ресурс, ч;

$[T]$ — допускаемый технический ресурс, ч.

Для оценки технического ресурса узла трения винт—обойма с учетом параметрических отказов используем формулу для вращательной кинематической пары [1]:

$$T = \frac{60\ 000 A E_{\text{пр}} \varepsilon d h_e}{\pi P n} \geqslant [T], \qquad (1)$$

где P — нагрузка, определяемая из силового расчета трибосопряжения винт—обойма, МПа;

n — частота вращения винта, задается кинематическим анализом погружного винтового насоса, мин$^{-1}$;

h_e — зазор в сопряжении, установленный расчетом на точность, мм;

$E_{\text{пр}}$ — приведенный модуль упругости, обусловленный видом материалов пары винт—обойма, МПа;

A — коэффициент, устанавливаемый экспериментально или на основе испытаний погружного насоса в различных средах, при прокачке нефти $A \approx 0{,}1...0{,}5$;

ε — угловое ускорение винта, с$^{-2}$;

d — диаметр винта, мм.

Расчетный технический ресурс может быть ограничен заданными пределами путем соответствующей корректировки составляющих формулы (1).

Оценка допустимых нагрузок подшипников качения. Износ подшипников качения — следствие проскальзывания тел качения при их движении по канавке сепаратора, так как пути трения во внутреннем и внешнем кольцах разные [2]. Определенную роль играет также механический фактор, выражающийся в преобладании момента сопротивления над моментом движущихся сил (рис. 1).

Интенсивность изнашивания подшипников в сложных условиях эксплуатации погружного насоса достаточно высокая. При чрезмерной обводненности добываемой нефти, наличия в ней различных примесей трущиеся поверхности плохо смазываются, и трение по своему характеру приближается к трению без смазки.

Расчет интенсивности изнашивания подшипников качения выполняли по формуле [3]:

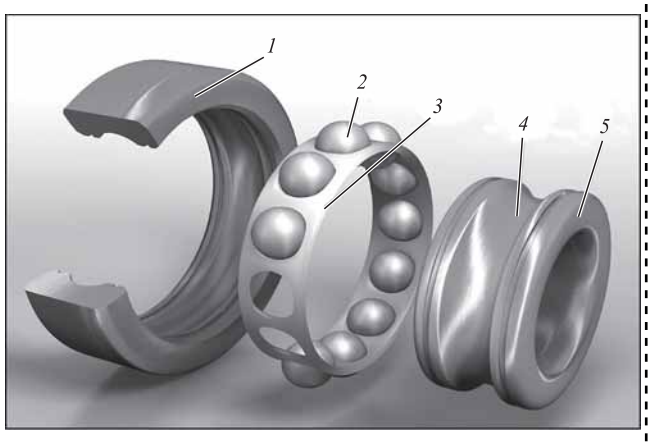


Рис. 1. Детали трибосопряжения подшипника качения: *1* — внешнее кольцо; *2* — шарик; *3* — сепаратор; *4* — дорожка качания (рабочая часть); *5* — внутреннее кольцо

$$I = \frac{I_0 \psi R' r}{2\pi R \mu E_{\text{с}} f^x (x+1)} \left(\frac{2T}{l\delta} \right)^{x-1}, \qquad (2)$$

где I_0 — интенсивность изнашивания при давлении $P = 0{,}1$ МПа;

ψ — отношение истинного проскальзывания к кажущемуся;

R — радиус дорожки трения, мм;

μ — безразмерный коэффициент, характеризующий тангенциальную жесткость контакта в направлении проскальзывания;

x — показатель степени, отражающий влияние нагрузки на износ и зависящий от вида деформации неровностей (упругий или пластический контакт);

δ — ширина площади контакта, мм;

R' — приведенный радиус, мм;

r — радиус тела качения (шарика ролика);

$E_{\text{с}}$ — средний модуль упругости материалов трибосопряжения, Н/мм^2.

Используя экспериментальные данные и выполнив преобразования над выражением (2), получим зависимость интенсивности изнашивания подшипников:

$$I = \frac{I_0 \psi R' f z}{\pi \mu (x+1)} (0{,}6 P_{\max})^{x+1} \left(\frac{1}{R_{\text{в}}} \frac{2}{R_{\text{ш}} z_0} \right),$$

где z_0 — число одновременно контактирующих шариков при действии только радиальной нагрузки;

$R_{\text{в}}$ — радиус внутреннего кольца по желобу, мм;

$R_{\text{ш}}$ — радиус шариков, мм;

z — число шариков;

f — коэффициент трения.

В результате проведения экспериментальных наблюдений подтверждена зависимость между нагрузкой P и ресурсом подшипника L:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^{\alpha}, \qquad (3)$$

где C — динамическая грузоподъемность — постоянная нагрузка, которую подшипник может выдержать до появления признаков усталости в течение 10^6 оборотов, Н;

α — показатель степени, равный 3 для шарикоподшипников и 3,33 для роликоподшипников.

Зависимость (3) — уравнение наклонной ветви кривой усталости. Подбор стандартных подшипников проводится по формуле (3) в соответствии с методикой, изложенной в работе [4]. Для подшипников качения расчетный технический ресурс имеет вид:

$$T = \frac{AE_{\text{пр}}F_{\text{к}}h_e}{P\left[\bar{V}_z + W_z\bar{r}_z + W_x\bar{r}_x + W_y\bar{r}_y\right]}, \qquad (4)$$

где $\bar{V}_z$ — вектор скорости тела качения по оси z;

W_x, W_y, W_z — угловые скорости радиуса тела качения по осям x, y, z;

h_e — зазор в сопряжении тела качения, мм.

В формуле (4) приведенный модуль упругости определяем по формуле:

$$E_{\text{пр}} = \frac{2E_{\text{ш}}E_{\text{к}}}{E_{\text{ш}} + E_{\text{к}}},$$

где $E_{\text{ш}}$ — модуль упругости шарика или ролика, МПа;

$E_{\text{к}}$ — модуль упругости кольца подшипника, МПа.

Путем решения контактной задачи Герца теории упругости определим контактные напряжения в подшипниках качения. Для шарикоподшипников контактное напряжение:

$$\sigma = 8400\sqrt[3]{\frac{10P}{zd_{\text{ш}}^2}}, \qquad (5)$$

а для подшипников с короткими цилиндрическими роликами:

$$\sigma = 1900\sqrt{\frac{10P}{zd_{\text{р}}l_{\text{эф}}}}, \qquad (6)$$

где P — радиальная нагрузка на подшипник, Н;

z — число шариков для шарикового и число роликов для роликового подшипника;

$d_{\text{ш}}$ — диаметр шариков, мм;

$d_{\text{р}}$ — диаметр роликов, мм;

$l_{\text{эф}}$ — эффективная длина, мм.

Наибольшие допускаемые контактные напряжения для подшипниковых сталей принимаем при начальном касании в точке до давления 5000 МПа, при начальном касании по линии — до 3000 МПа.

Допустимые значения радиальных нагрузок для шарикоподшипников и роликоподшипников соответственно:

$$P = 35,4zd_{\text{ш}}^2 \text{ и } P = 24,9zd_{\text{р}}l_{\text{эф}}.$$

Оценка технического ресурса зубчатой передачи. Трибосопряжение зубчатых колес — важный элемент в редукторе погружного насоса и влияет на его коэффициент полезного действия при работе на сложных скважинах с механическими примесями и высокой вязкостью нефти.

Расчетный срок службы зубчатого колеса определим через параметры прототипа по формуле:

$$T_{\text{р}} = T_{\text{п}}\frac{\text{v}_{\text{п}}p_{\text{п}}H_{\text{п}}}{\text{v}_{\text{р}}p_{\text{р}}H_{\text{р}}}, \qquad (7)$$

где $T_{\text{п}}$ — срок службы прототипа, ч;

$\text{v}_{\text{п}}$, $\text{v}_{\text{р}}$ — скорость трения зубьев прототипа и рассчитываемого колеса соответственно, м/с;

$p_{\text{п}}$, $p_{\text{р}}$ — среднее удельное давление на поверхности зубьев прототипа и рассчитываемого колеса соответственно, МПа;

$H_{\text{п}}$, $H_{\text{р}}$ — твердость поверхности зубьев прототипа и рассчитываемой детали соответственно, HRC.

Здесь коэффициенты степени при p и v приняты равными единице.

Для выражения членов формулы (7) через конструктивные параметры зубчатых колес рассмотрим зацепление двух колес. Если два профиля зубчатых колес касаются в точке C (рис. 2, *а*), то наблюдается перекатывание и скольжение зубьев. Относительную скорость скольжения $\text{v}_{\text{ск}}$ можно определить, используя правило механики. Сообщим всей системе угловую скорость ω_1 с обратным знаком. При этом шестерня останавливается, а колесо поворачивается вокруг полюса зацепления П, как мгновенного центра, с угловой скоростью,

равной ($\omega_1 + \omega_2$). Тогда скорость относительного движения (скольжения) в точке C определяем как

$$v_{ск} = e(\omega_1 + \omega_2),$$

где ω_1 и ω_2 — угловые скорости первого и второго колеса соответственно;

e — расстояние от полюса до точки контакта.

Скорость скольжения в полюсе равна нулю, а при переходе через полюс меняет знак. На поверхности зубьев максимальное скольжение наблюдается на ножках и головках зубьев, на начальной окружности оно равно нулю и изменяет направление (рис. 2, *б*). Скольжение сопровождается трением, которое способствует потерям в зацеплении и износу зубьев. У ведущих зубьев силы трения направлены от начальной окружности, а у ведомых — к начальной окружности.

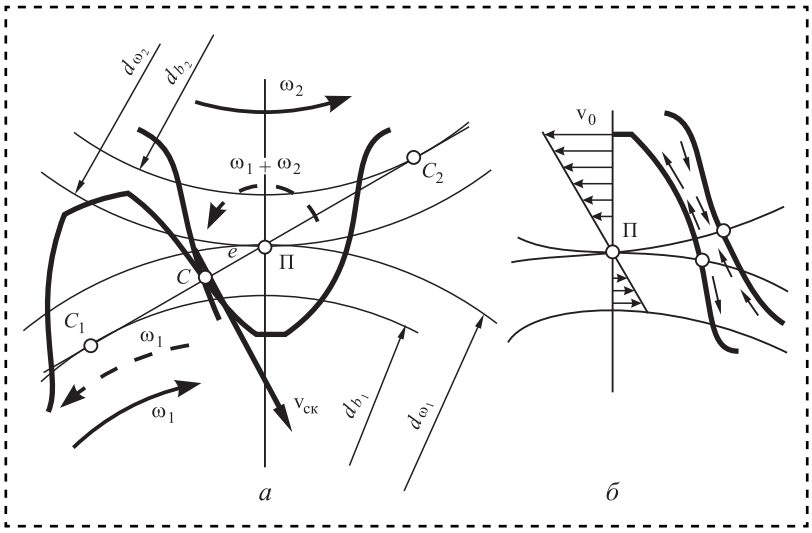


Рис. 2. Перекатывание, скольжение (*а*) и трение (*б*) зубьев трибосопряжения зубчатой передачи

Скорость скольжения определим из плана скоростей как вектор, пропорциональный отрезку (C_1C_2). За полюс плана скоростей принимаем точку C.

Для внешнего зацепления скорость скольжения равна

$$v_{ск} = v_{C_2C_1} = (\omega_1 + \omega_2)(P_0C),$$

а для внутреннего зацепления

$$v_{ск} = (\omega_1 - \omega_2)(P_0C),$$

где P_0C — расстояние от точки зацепления до полюса.

В теории механизмов и машин для оценки взаимного скольжения профилей используют понятие коэффициента скольжения зубьев. Формулы для определения коэффициентов скольжения λ_1 и λ_2 для внешнего зацепления, λ_1' и λ_2' для внутреннего зацепления имеют вид:

$$\lambda_1 = \left(1 + \frac{1}{i_{12}}\right)\frac{(P_0C)}{\rho_1};\ \lambda_2 = (1 + i_{12})\frac{(P_0C)}{\rho_2};$$

$$\lambda_1' = \left(1 + \frac{1}{i_{12}}\right)\frac{(P_0C)}{\rho_1};\ \lambda_2' = (1 + i_{12})\frac{(P_0C)}{\rho_2},$$

где i_{12} — передаточное отношение зубчатых колес 1 и 2;

ρ_1 и ρ_2 — плотность материала 1 и 2 колеса соответственно, кг/м^3.

Для расчета на долговечность берем наибольшее значение (P_0C) расстояния от точки зацепления до полюса. Аналитически это выражение равно половине длины линии зацепления ab, т.е.:

$$P_0C = \frac{ab}{2} = 0,5\left(\sqrt{R_{г_1}^2 - z_1^2} + \sqrt{R_{г_2}^2 - z_2^2} - A\sin\alpha\right),$$

где $R_{г_1}$ и $R_{г_2}$ — радиусы окружностей головок колес, мм;

A — межцентровое расстояние, мм;

r_1 и r_2 — радиусы основных окружностей колес.

Удельное давление двух контактирующих колес определим по формуле:

$$P = \frac{M_к\,(i \pm 1)\,K_к K_д}{Abi\cos\alpha},$$

где $M_к$ — крутящий момент, приложенный к валу ведомого колеса, Н·м;

i — передаточное отношение;

b — ширина колес, мм;

α — угол зацепления, °;

$K_к$ — коэффициент концентраций нагрузки;

$K_д$ — коэффициент динамичности нагрузки.

При подстановке полученных значений в выражение (7) формула примет вид:

$$T_{\text{р}} = T_{\text{п}} \frac{(\omega_{1\text{п}} \pm \omega_{2\text{п}})\left[0,5\sqrt{R_{\text{г}1\text{п}}^2 - z_{1\text{п}}^2} + \sqrt{R_{\text{г}2\text{п}}^2 - z_{2\text{п}}^2} - A_{\text{п}} \sin\alpha_{\text{п}}\right]}{(\omega_{1\text{р}} \pm \omega_{2\text{р}})\left[0,5\sqrt{R_{\text{г}1\text{р}}^2 - z_{1\text{р}}^2} + \sqrt{R_{\text{г}2\text{р}}^2 - z_{2\text{р}}^2} - A_{\text{р}} \sin\alpha_{\text{р}}\right]} \frac{M_{\text{кп}}(i_{\text{п}} \pm 1) K_{\text{кп}} K_{\text{дп}} A_{\text{р}} b_{\text{р}} i_{\text{р}} \cos\alpha_{\text{р}}}{M_{\text{кр}}(i_{\text{р}} \pm 1) K_{\text{кр}} K_{\text{др}} A_{\text{п}} b_{\text{п}} i_{\text{п}} \cos\alpha_{\text{п}}}.$$

Выражая угловые скорости через частоту вращения и проведя преобразования, получаем расчетный срок службы зубчатого колеса:

$$T_{\text{р}} = T_{\text{п}} \frac{(H_{1\text{п}} \pm H_{2\text{п}})\left(\sqrt{R_{\text{г}1\text{п}}^2 - z_{1\text{п}}^2} + \sqrt{R_{\text{г}2\text{п}}^2 - z_{2\text{п}}^2} - A_{\text{п}} \sin\alpha_{\text{п}}\right)}{(H_{1\text{р}} \pm H_{2\text{р}})\left(\sqrt{R_{\text{г}1\text{р}}^2 - z_{1\text{р}}^2} + \sqrt{R_{\text{г}2\text{р}}^2 - z_{2\text{р}}^2} - A_{\text{р}} \sin\alpha_{\text{р}}\right)} \frac{M_{\text{кп}}(i_{\text{п}} \pm 1) K_{\text{кп}} K_{\text{дп}} A_{\text{р}} b_{\text{р}} i_{\text{р}} \cos\alpha_{\text{р}}}{M_{\text{кр}}(i_{\text{р}} \pm 1) K_{\text{кр}} K_{\text{др}} A_{\text{п}} b_{\text{п}} i_{\text{п}} \cos\alpha_{\text{п}}}. \quad (8)$$

Примем $K_{\text{кп}} = K_{\text{кр}} K_{\text{дп}} = K_{\text{др}} \alpha_{\text{п}} = \alpha_{\text{р}_1}$, а $n_1 \pm n_2$ представим как $n_2(i \pm 2)$, где n_2 — частота вращения ведомого колеса. Тогда формула оценки расчетного срока службы зубчатой передачи приобретет окончательный вид:

$$T_{\text{р}} = T_{\text{п}} \frac{n_{2\text{п}}\left(m\sqrt{0,5z_{\text{п}}^2 + z_{\text{п}} + 1} + \sqrt{m(z_{\text{п}} + 1)} - 0,5mz_{\text{п}}(i_{\text{п}} + 1)\sin\alpha\right)}{n_{2\text{р}}\left(m\sqrt{0,5z_{\text{р}}^2 + z_{\text{р}} + 1} + \sqrt{m(z_{\text{р}} + 1)} - 0,5mz_{\text{р}}(i_{\text{р}} + 1)\sin\alpha\right)} \frac{M_{\text{кп}} \varphi_{A\text{п}} \dfrac{0,25}{i} z_{\text{п}}^2 (i_{\text{п}} + 1)^4}{M_{\text{кр}} \varphi_{A\text{р}} \dfrac{0,25}{i} z_{\text{р}}^2 (i_{\text{р}} + 1)^4},$$

где m — модуль передачи;

$z_{\text{п}}$, $z_{\text{р}}$ — число зубьев прототипа и рассчитываемого колеса;

$i_{\text{п}}$, $i_{\text{р}}$ — передаточное отношение прототипа и рассчитываемой передачи;

$\varphi_{A\text{п}}$, $\varphi_{A\text{р}}$ — коэффициент ширины зуба прототипа и рассчитываемого колеса;

$n_{2\text{п}}$, $n_{2\text{р}}$ — частота вращения прототипа и рассчитываемого колеса, мин$^{-1}$.

Заключение

Наиболее изнашиваемые детали трибосопряжений погружного насоса — пара винт—обойма, подшипники качения и зубчатая передача. Выведены аналитические выражения для оценки технического ресурса и допустимых нагрузок наиболее ответственных деталей трибосопряжений. Анализ работоспособности этих деталей и предложенные методики расчета их технического ресурса позволяют объективно оценить запас их прочности и использовать для практического определения надежности работы насосного агрегата.

Библиографический список

1. **Дунаев П.Ф., Леликов О.П.** Конструирование узлов деталей машин. М.: Академия, 2007. 496 с.

2. **Черменский О.Н., Федотов Н.Н.** Подшипники качения. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.

3. **ГОСТ Р 54660—2011.** Подшипники качения. Статическая грузоподъемность. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.

4. **Чернышов В.Н., Мишин В.В., Пальчевский А.В., Селихов А.В.** Моделирование активного сопротивления подшипникового узла // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 2—2 (286). С. 18—23.

УДК 621.793

С.Р. Шехтман, *д-р техн. наук,* **Н.А. Сухова,** *канд. техн. наук,* **М.Ш. Мигранов,** *д-р техн. наук*
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: migmars@mail.ru

Защита деталей авиационной техники от агрессивного воздействия

Разработана технология нанесения защитного покрытия на детали авиационной техники. Проведены исследования свойств полученного наноструктурированного покрытия, осажденного с использованием плазменного ассистирования.

A developed mechanism for applying a protective coating on parts of aviation equipment is presented. Studies of the properties of the resulting nanostructured coating deposited using plasma assist are carried out.

Ключевые слова: наноструктурированные покрытия, плазменное ассистирование, технология, защита поверхности.

Keywords: nanostructured coatings, plasma assisting, technology, surface protection.

Как показывает практика и многочисленные исследования, в большинстве случаев разрушение деталей авиадвигателей начинается с поверхности или зарождается в тонком приповерхностном слое [1]. Поэтому особенно важно (экономически и технологически) разработать технологии получения функциональных и упрочняющих покрытий, свойства которых по прочности и пластичности недостижимы для традиционных моно- и поликристаллических структур. При этом возможно применение одного из принципов нанотехнологии: создание объекта осуществляется не "сверху вниз" (например, когда при формообразовании снимается припуск с заготовки), а "снизу вверх" (когда поверхность "достраивается" до необходимых размеров детали, причем последняя приобретает новое качественное состояние по прочности, пластичности, износостойкости, коррозионной стойкости и др.) [2—4].

На современном этапе развития техники покрытия, используемые для ряда деталей авиационной техники, работающей в условиях повышенных температур, высоких знакопеременных нагрузок и агрессивных сред, не всегда отвечают необходимым требованиям по их защите. В связи с этим продолжается поиск новых технологий нанесения покрытий, направленный на создание многослойных композиций, обладающих более высокими механическими и эксплуатационными свойствами по сравнению с монослойными [1, 4—6].

Метод вакуумного ионно-плазменного осаждения покрытий позволяет получать поверхностные слои со специальными свойствами и отличается универсальностью технологического процесса, высокими скоростью нанесения покрытий, воспроизводимостью параметров и практически полной экологической безопасностью.

Метод позволяет получать многослойные покрытия с чередующимися слоями из различных материалов, например, до нескольких десятков слоев Ti, Ti_xN_y и TiN толщиной менее 100 нм [2, 3]. Благодаря особенностям строения, ультрамалой толщине слоев и их большому количеству, а также возможности плотного сопряжения слоев различных материалов, наноструктурированные покрытия сочетают в себе качества слоистых систем и специфические свойства нанообъектов.

С уменьшением толщины пленки до 100 нм ее поверхностные свойства начинают доминировать над объемными. При этом тонкие пленки имеют физические свойства, которые

существенно отличаются от свойств объемных образцов из того же материала. Они зависят не столько от химического состава, сколько от формы и размеров наноструктур и во многих случаях на порядок превосходят характеристики монолитных материалов. Объясняется это более совершенной структурой сверхтонких пленок и более высокой внутренней энергией за счет перераспределения вклада в прочностные свойства материала поверхности по сравнению с объемом [4—7].

Разработана технология осаждения многослойного наноструктурированного покрытия системы Ti—TiN. Она предусматривает в одном технологическом цикле предварительную ионную очистку поверхности плазмой несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда, нагрев деталей ионами металла, нанесение многослойных покрытий в условиях плазменного ассистирования. Наноструктурированные покрытия получены на модернизированной установке ННВ 6,6 — И1.

Первый этап процесса — ионная очистка и активация центров адсорбции на обрабатываемой поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом проводили с помощью плазменного источника "ПИНК" в среде аргона при давлении 10^{-1} Па, отрицательном смещении (900...1100 В) на подложке, токе разряда 30...40 А, длительность обработки — 1...2 мин до прекращения возникновения микродуг. Такой режим позволяет избежать внедрения ионов металлической плазмы на стадии предварительной очистки, исключить привязывание микродуг к поверхности, снизить температуру предварительного нагрева до 100...200 °С.

На втором этапе формирования многослойного наноструктурированного покрытия осуществляется взаимодействие частиц из ускоренного плазменного потока электродугового испарителя с титановым катодом с поверхностью, поверхностная миграция атомов и ионов титана, ионное перемешивание адсорбированных частиц. Формируется титановый слой. В качестве катода использовали технически чистый титан марки ВТ1-0.

На третьем этапе в вакуумную камеру подается рабочий газ азот (N_2) и происходит формирование слоя наноструктурированного покрытия Ti_xN_y.

На четвертом этапе количество рабочего газа увеличивают для формирования на поверхности слоя TiN, затем снижают, и на поверхности осаждаются слои покрытия Ti_xN_y либо чистого Ti (в зависимости от требуемого состава покрытия). Осаждение Ti из плазмы, генерируемой электродуговым испарителем, осуществляется в условиях плазменного ассистирования. Число повторений третьего и четвертого этапов зависит от заданного числа слоев.

В процессе нанесения покрытия осуществляется равномерное планетарное вращение обрабатываемой детали относительно собственной оси и одновременно вокруг оси стола, благодаря чему обеспечивается равномерность осаждения покрытий. Температура процесса 350...450 °С. Нагрев обусловлен энергией, приносимой осаждаемыми частицами. Толщина покрытия 5...7 мкм. Число слоев и их толщина задаются режимами напыления.

Чтобы получить многослойные наноструктурированные вакуумные ионно-плазменные покрытия, необходимо соблюдать следующие основные правила:

1. Многослойные композиции должны состоять из множества сверхтонких (менее 100 нм) слоев.

2. При синтезе необходимо стремиться поддерживать температуру конденсации близкой к минимальной (приблизительно 350...450 °С).

В целях исследования структуры нанесенного материала и определения его фазового состава проведены рентгеноструктурные исследования (рис. 1). Анализ физического уширения рентгеновских пиков исследуемого образца проводили сравнением интегральной ширины дифракционных пиков на половине их высоты с шириной рентгеновских пиков эталона. Дифракционные пики рентгенограммы для образцов, полученных по предлагаемой технологии, по величине физического уширения и по конфигурации характеризуется значительным физическим уширением вследствие малого размера зерна.

Усталостные испытания проводили на деталях, изготовленных из материала ВТ6 с наноструктурированными многослойными покрытиями Ti—TiN. При этом имитировались все виды нагружения и нагрева, максимально приближающиеся к эксплуатационным. Обязательным условием при таких испытани-

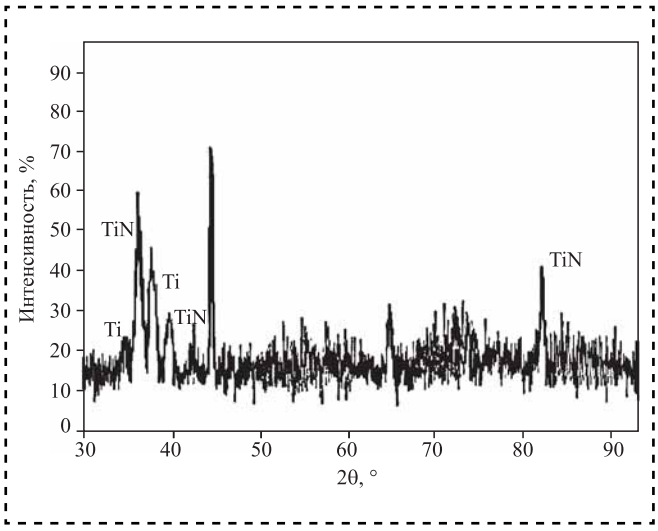


Рис. 1. Рентгенограмма наноструктурированного многослойного покрытия Ti—TiN

ях является реализация заданного напряженно-деформированного состояния в деталях в целом и в опасном сечении. Один из критериев правильности выбора схемы испытаний — идентичность получаемых разрушений разрушениям деталей, наблюдаемых в эксплуатации.

При периодических испытаниях на усталость использовали контрольные нормативы, представляющие собой контрольный уровень напряжений $\sigma_к$, базовое число циклов нагружения $N_к$ и число испытываемых лопаток n.

После испытаний на усталость все лопатки проверяли на наличие трещин. Предварительная обработка поверхности соответствовала базовому технологическому процессу. Финишная операция перед нанесением покрытий — полирование.

Результаты периодических испытаний считаются удовлетворительными, если все n лопаток не разрушатся на контрольном уровне напряжения $\sigma_к$ и базовом числе циклов нагружения $N_к$. Испытания проводили на вибродинамическом стенде на базе $N = 2 \cdot 10^6$ циклов на шести лопатках.

Для определения влияния одно-, многослойных и наноструктурных покрытий на сопротивление усталости проведены исследования на лопатках компрессора и на образцах из авиационных материалов: 13Х11Н2В2МФ-Ш (ЭИ961-Ш) и титанового сплава ВТ6. Испытания проводили на электродинамическом вибростенде в нормальных условиях по первой изгибной форме колебаний на лопатках методом "лестница": $\sigma_{нач}$ = 480 МПа на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов. На лопатки и цилиндрические образцы наносили покрытие на основе Ti—TiN, однослойное, многослойное (трехслойное) и наноструктурированное.

Установлено, что предел выносливости для наноструктурированного покрытия на материале ЭИ961-Ш выше на 9,5 % по сравнению с однослойным покрытием и на 6,5 % выше, чем на образце с многослойным (трехслойным) покрытием (рис. 2, *а*).

Для материала ВТ6 установлено, что предел выносливости для наноструктурированного покрытия выше на 10,3 % по сравнению с однослойным покрытием и на 8,3 % выше, чем на образце с многослойным (трехслойным) покрытием (рис. 2, *б*).

Результаты испытания образцов на усталость (табл. 1) показывают, что наличие покрытия приводит к небольшому снижению сопротивления усталости. В то же время сопротивление усталости образцов с наноструктурированными покрытиями выше, чем образцов с много- и однослойными покрытиями. Это может быть объяснено снижением остаточных напряжений в многослойных и наноструктурированных покрытиях.

Эрозионное изнашивание лопаток компрессора ГТД из-за абразивного воздействия содержащихся в воздушном потоке частиц пыли, песка, золы и других веществ — одна из причин разрушения поверхности лопаток, выхода из строя лопаток, потери газодинамической устойчивости компрессора и сокращения ресурса двигателя или его ремонт.

Эрозионную стойкость образцов с покрытиями оценивали методом сравнительных испытаний на специализированном стенде по методике, разработанной ВИАМ. Угол атаки пылевоздушного потока 20°. Число циклов 10.

Для оценки эрозионной стойкости изготовлены образцы из материала ВТ6 с покрытием Ti—TiN с субмикрокристаллической (СМК) структурой. Толщина покрытий 5...7 мкм. Многослойного покрытие осаждали с использованием плазменного ассистирования (табл. 2).

Проведенные исследования показали, что при использовании в качестве защитного слоя многослойного покрытия с СМК-структурой возможно повышение эрозионной стойкости.

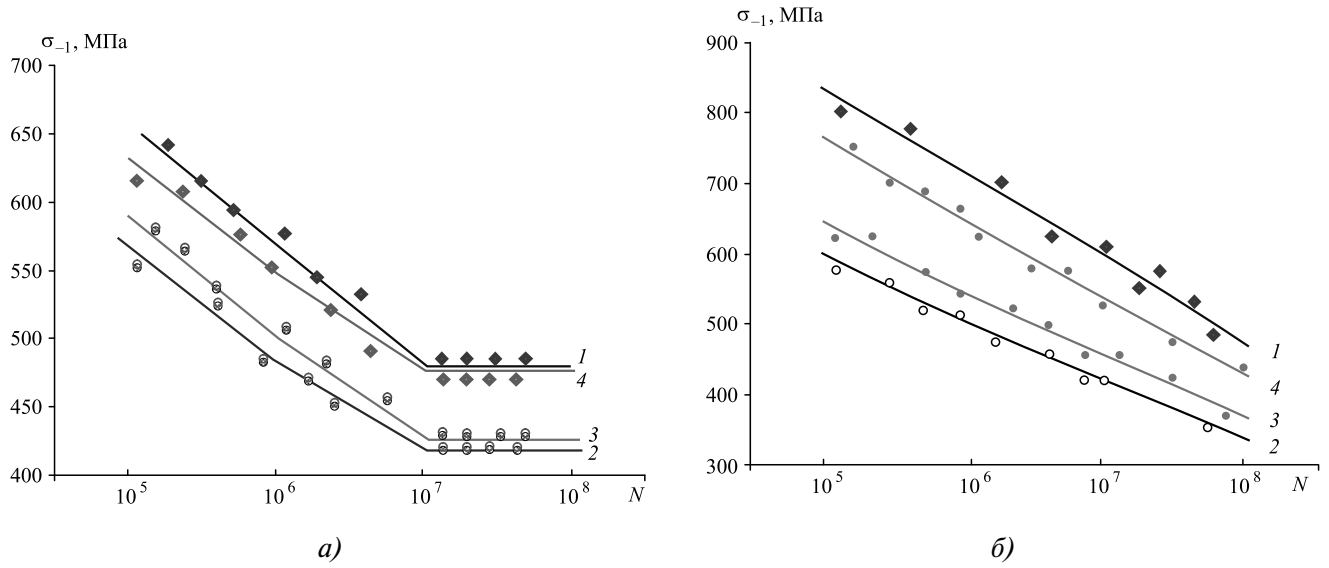


Рис. 2. Влияние вида покрытия на предел выносливости:
а — подложка — сталь 13Х11Н2В2МФ-Ш; *б* — подложка — ВТ6; *1* — исходное состояние без покрытия; *2* — покрытие Ti—N; *3* — многослойное покрытие (3 слоя); *4* — наноструктурированное покрытие

Таблица 1

Результаты испытания образцов на усталость

Материал	Состояние обрабатываемой детали	Предел выносливости, МПа	Изменение предела выносливости, %
13Х11Н2В2МВ-Ш (ЭИ961-Ш)	Без покрытия	480	—
	Покрытие Ti—N	420	−12,5
	Многослойное покрытие (3 слоя)	430	−10,4
	Наноструктурированное покрытие	460	−4,2
ВТ6	Без покрытия	560	—
	Покрытие Ti—N	480	−14,2
	Многослойное покрытие (3 слоя)	490	−12,5
	Наноструктурированное покрытие	520	−7,14

Таблица 2

Результаты исследований на эрозионную стойкость

Образец	Начальная масса, г	Потеря массы, г
Исходный образец (материал ВТ6)	4,843155	0,00285
ВТ6 + покрытие TiN (однослойное)	4,75285	0,00197
ВТ6 + наноструктурное покрытие Ti—TiN	5,1770	0,00169

У образцов ВТ6 с однослойным покрытием TiN эрозионная стойкость в 1,5 раза выше, чем исходных образцов ВТ6 без покрытия. У образцов ВТ6 с наноструктурированным покрытием Ti—TiN эрозионная стойкость в 1,9 раза выше, чем исходных образцов ВТ6 без покрытия и в 1,3 раза выше, чем образцов из материала ВТ6 с однослойным покрытием TiN.

Библиографический список

1. **Будилов В.В., Мухин В.С., Шехтман С.Р.** Нанотехнологии обработки поверхности деталей на основе вакуумных ионно-плазменных методов. Физические основы и технические решения. М.: Наука, 2008. 194 с.

2. **Белоус В.А.** Разработки ННЦ ХФТИ в области ионно-плазменных обработок конструкционных материалов // Харьковская научная ассамблея. 2006. С. 60—73.

3. **Мухин В.С., Шехтман С.Р.** Поверхность технического объекта: физика, химия, механика, нанотехнология модифицирования // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9. № 1 (19). С. 84—91.

4. **Пул Ч., Оуэнс Ф.** Нанотехнологии. М.: Техносфера, 2005. 336 с.

5. **Schipachev A.** Optimum conditions of turning and surface plastic deformation determination taking into account technological heredity // IOP conf. Series: Journal of physics: Conference series. Vol. 1118. 2018.

6. **Афанасьева Ю.Д., Шехтман С.Р.** Технология нанесения покрытия Ti—TiN на режущий инструмент // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2018. Т. 22. № 3 (81). С. 3—9.

7. **Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Минигалеев С.М., Шехтман С.Р.** Трибологические свойства многослойных покрытий для режущего инструмента // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 3. С. 304—309.

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

СПРАВОЧНИК технолога-машиностроителя

в 2-х томах

Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина

Издание 6-е, переработанное и дополненное 2018 г. 1574 с.

В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.

Цена 15 000 руб.

Том 1. Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.

Том 2. Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизикохимическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

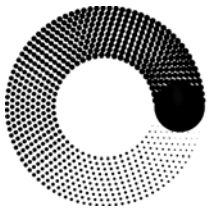
Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

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

МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КОВРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ В.А. ДЕГТЯРЕВА
ЖУРНАЛ "СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

VI Международный научно-технический семинар

"СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СБОРКИ"



МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ

МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ

18—19 октября 2019 г.

Тематика семинара:

- Современные методы сборки
- Автоматизация сборочных работ
- Обеспечение качества сборки
- Сборочное оборудование

Адрес: Москва, ул. Автозаводская, д. 16, ауд. 1804

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **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 12.02.2019. Подписано в печать 03.04.2019. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.