### **ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ

И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ

ЖУРНАЛ



ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ журнал входит в перечень утвержденных вак рф изданий для публикаций трудов соискателей ученых степеней

# $5^{\frac{2014}{(166)}}$

### СОДЕРЖАНИЕ

#### Ресурс машин и конструкций Шаломов В.И. Вспомогательный турбонасос с ротором на газовых 3 Современные технологии сборки Иванов А.А. Системы автоматической сортировки деталей на два 7 Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Фазовый портрет способа автоматизированной сборки, осуществляющего стабилизацию движения детали относи-12 Обеспечение качества. Испытания. Контроль Адакин В.А. Обеспечение точности прямоугольных шлицевых профилей на валах при многопроходном холодном пластическом формообразо-18 Гоцеридзе Р.М., Румянцев С.В. Пути повышения точности при фазовом методе измерения параметров статической неуравновешенности 25 В помощь конструктору, технологу Виноградов А.Н., Липатов С.И., Марголит Р.Б. Проблемы сборки 30 Житников Б.Ю., Житников Ю.З. Определение величины пластической Измайлов А.Д., Плешаков А.А., Горелова А.Ю., Кристаль М.Г. Повышение 36 Шерышев А.Е., Шерышев М.А., Трунова Е.А. Модель свободного термоформования изделий с относительно малой глубиной формования 38 В порядке обсуждения Григорьев В.С., Миронычев Н.А. Описание системы допусков и посадок 42 Разное Микаева С.А., Микаева А.С. Адаптивная модель сборки комплекта "люминесцентная лампа – импульсный электронный полупроводниковый 45 Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" - **79748**, Объединенному

почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" – **79748**, Объединенному каталогу "Пресса России" – **84967**, каталогу "Почта России" – **60257**) или непосредственно в издательстве *Тел.:* (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97. E-mail: sborka@mashin.ru 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 Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН Редакционный совет МСКВА А.И. КУМЕН

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф. А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф. М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф. И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц. Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н. Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н. А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф. А.В. МЕДАРЪ, к.т.н. Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН В.В. ПОРОШИН, д.т.н., проф. Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф. А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц. А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф. Г.А. ЯРКОВ, инж.

А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н.,

А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.

В.А. НИКОЛАЕВ, к.т.н., проф.

Г.А. КУЛАКОВ, д.т.н.

В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.

М.А. ЕВДОКИМОВ, д.п.н., проф.

А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

CAMAPA

проф.

#### Региональные редсоветы БЕЛГОРОД ОРЕНБУРГ Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н. А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н. БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф ВЛАДИВОСТОК Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н.,

чл.-кор. РАН А.А. СУПОНЯ, к.т.н. ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц. М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.

В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

**НЖЕВСК** И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф. Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф. КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф. КОВРАЯ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф. КЛАЛМНА

Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф. КОМСОМОЛЬСК-

**НА-АМУРЕ** Б.Н. МАРЬИН, д.т.н. В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф. НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н., проф.

С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н., проф. Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н. НИЖНИЙ НОВГОРОА

С.В. ГОЛУБЕВ, инж. ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н. ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф. Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф. Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ В.Ф. КУЗЬМИН, к.т.н. Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф. ТОЛЬЯТТИ А.И. РЫЖКОВ, к.т.н. ТУЛА В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф. ХАБАРОВСК

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф. Украина

KNEB

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф. В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н. **ДОНЕЦК** А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф. Беларись

MNHCK

В.Л. БАСИНЮК, д.т.н. М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф. ГОМЕЛЬ В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н. ИЗРАИЛЬ В.М. БЕДРИН, инж. ПОЛЬША П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н. Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н.

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1747 от 25 февраля 2000 г.

### THE MONTHLY NEWSMAGAZINE FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION



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

Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building" 107076, Moscow, Stromynsky per. 4

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

Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

Editors

#### MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor) M.V. VARTANOV A.A. GUSEV I.N. ZININA Yu.L. IVANOV Yu.G. KOZYREV

Regional editors BELGOROD N.A. PELIPENKO BRIANSK O.A. GORLENKO VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN A.A. Suponia **Volgograd** 

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

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

KAZAN R.I. Adgamov Kovrov

Yu.Z. ZHITNIKOV **KOLOMNA** Yu.D. AMIROV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR B.N. MARJIN

V.I. SCHPORT A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELNY S.V. DMITRIEV

R.M. KHISAMUTDINOV NIZHNY NOVGOROD S.V. GOLUBEV

OMSK V.N. KOSTIUKOV

**DREL** Yu.S. STEPANOV G.A. KHARLAMOV

ORENBURG A.N. POLYAKOV

A.I. SERDUK A.P. FOT A.I. KUMENKO A.V. MEDAR' E.A. MIKRIN V.V. POROSHIN B.V. SHANDROV A.A. SHATILOV A.G. KHOLODKOVA G.A. YARKOV

#### RYBINSK

V.F. BEZIAZYSHNY V.V. NEPOMILUEV

A.N. SEMENOV SAMARA

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

ST.-PETERSBURG

V.F. KUZMIN E.V. SHALOBAEV

TULA V.V. PREYS

TOLIATI

A.I. RYZHKOV Khabarovsk

V.A. LASHKO Ukraine

UK

**KIEV** A.S. ZENKIN V.A. MATVIENKO

DONETSK A.N. MIKHAILOV Sevastopol

E.L. PERVUKHINA Belarus

MINSK

V.L. BASINJUK M.L. KHEIFETZ GOMEL

V.E. STARZHINSKI ISRAEL V.M. BEDRIN POLAND

P.LEBKOVSKI E. LUNARSKI

**Executive editors of current issue:** Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

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

## РЕСУРС МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.65

#### В.И. Шаломов, канд. техн. наук

(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет) E-mail: seu@knastu.ru

# Вспомогательный турбонасос с ротором на газовых опорах

Рассмотрены пути повышения надежности переносных полупогружных центробежных турбонасосов, выпускаемых на Амурском судостроительном заводе. Недостатком конструкции был преждевременный износ нижней опоры качения подшипникового узла. Предметом реконструкции является ротор турбонасоса. Предложена конструкция турбонасоса с газовыми пористыми опорами на воздушной смазке. Показаны предварительные результаты расчетной оценки энергетических показателей насоса.

Considered ways of the increase of the reliability of portable semi-submersible centrifugal turbo pumps, produced at the Amur shipyard. The shortcoming was premature wear on the bottom of bearing construction of the bearing unit. The object of reconstruction is the rotor turbine pump. The design of the turbine pump with gas porous supports and air lubrication. Shows the preliminary results of estimating the energy parameters of the pump.

Ключевые слова: надежность, центробежный турбонасос, газостатический подшипник, пористый питатель, коэффициент проницаемости, воздушная смазка, энергетический параметр.

**Keywords:** reliability, centrifugal turbine pamp, gas-static bearing, porous feeder, permeability coefficient, air lubrication, power parameter.

Самое широкое распространение в различных отраслях промышленности нашли центробежные насосы. Одним из наиболее важных эксплуатационных показателей насосов является их надежность. По данным статистических исследований основная причина выхода из строя центробежных насосов – это износ деталей (более 50 %) [1].

Наименее надежными узлами являются сальниковые уплотнения и подшипники. В источнике [2] на долю подшипников относят около 37 % дефектов. Отказы, связанные с износом центробежных насосов, зависят от ряда конструкционных, технологических и эксплуатационных факторов. Результаты изучения основных причин характерных отказов насосов свидетельствуют о возможностях разработки альтернативных конструкций основных узлов.

Выпуск полупогружного переносного центробежного турбонасоса типа ТНВ был освоен на Амурском судостроительном заводе в г. Комсомольск-на-Амуре. Применение турбонасоса чрезвычайно разнообразно, в том числе для осушения частично заполненных водой помещений и отсеков транспортных судов, как в период повседневной эксплуатации, так и в условиях аварийных ситуаций.

Технические характеристики турбонасоса:

Подача
Напор
Температура перекачиваемой жидкости 303 К
Частота вращения вала
Расход воздуха на приводную турбину 0,13 кг/с
Масса турбонасоса

Конструкция турбонасоса представлена на рис. 1.

В состав турбонасоса входят одноступенчатый центробежный насос с осевым подводом жидкости и приводная воздушная радиальная турбина. Для привода турбины используется сжатый воздух давлением 0,6...0,8 МПа. В качестве опор вала применены подшипники качения с консистентной смазкой.

Рабочие колеса 5 и 1 радиальной одноступенчатой турбины и насоса расположены на одном валу 12 в общем корпусе 3. Рабочий венец парциальной турбины с литыми лопатками постоянного сечения закреплен на верхней шейке вала с помощью шпонки. Центробежное рабочее колесо насоса закреплено на нижней шейке вала с помощью шпонки и винта.



#### Рис. 1. Конструкция турбонасоса:

1 – входное приемное устройство; 2 – напорный патрубок;
 3 – корпус; 4 – стакан; 5 – рабочее колесо турбины; 6 – радиальный подшипник; 7 – специальная гайка; 8 – крышка;
 9 – сопловой канал; 10 – автомат безопасности; 11 – подводящая трубка; 12 – вал; 13 – радиально-упорный подшипник;
 14 – рабочее колесо насоса

Крышка 8 выполнена за одно целое с ручкой, внутри которой предусмотрен выхлопной канал для отработанного в турбине сжатого воздуха. На всасывающей стороне насоса размещена сетка приемного устройства *1*.

К напорному патрубку присоединяется водонапорный шланг и коммуникационный трубопровод, соединяющий напорный патрубок с диафрагмой автомата безопасности 10. В верхней части корпуса размещен сопловой канал 9 турбины, который снабжен двумя профилированными сверхзвуковыми соплами.

В период эксплуатации новых насосов выявились серьезные конструктивные недостатки. В частности, таким недостатком стал преждевременный износ нижнего подшипникового узла. Этот дефект был устранен силами специалистов машиностроительного бюро конструкторского отдела завода. Была установлена сплошная втулка, объединяющая верхний и нижний подшипниковые узлы.

Однако в условиях высокой частоты вращения ротора (8000 мин<sup>-1</sup>) шарикоподшипники, как показала дальнейшая эксплуатация, оставались слабым

местом насоса. Таким образом, приемлемая надежность роторного узла так и не была достигнута.

Для повышения надежности и долговечности подшипниковых узлов предложено реконструировать насос путем установки вместо шарикоподшипников опор на газовой смазке.

Учитывая, что в качестве рабочего тела в турбоприводе используется сжатый воздух, наиболее приемлемым вариантом реконструкции подшипниковых узлов турбонасоса для работы в судовых условиях представляется применение опор на воздушной смазке. Эти подшипники используют при больших скоростях вращения и малых удельных нагрузках (p < 0,1 МПа) [1]. Однако несущая способность газовых опор существенно повышается, если использовать газостатические подшипники с пористыми или частично пористыми вкладышами. На несущую способность газовых опор с внешним наддувом решающее влияние оказывает давление питания.

Функцию подачи газа, входящего в несущую пленку газовой опоры, выполняют питатели дискретного или капиллярного вида. Пористые материалы рассматривают как совокупность питателей через капилляры.

Впервые пористые питатели были предложены в 1955 г. Монтгомери и Стерри для повышения допустимой нагрузки по сравнению с существующими системами с ограничивающими отверстиями (ограничители с простым отверстием и непосредственные ограничители).

Привлекательность пористого питателя становится очевидной, так как его применение устраняет необходимость прецизионного сверления отверстий малых диаметров — порядка 0,1...1,2 мм. При этом пористый материал допускает определенный объем засорений твердыми частицами без серьезного изменения сопротивления потоку, что позволяет создавать подшипники с достаточной несущей способностью и жесткостью смазочного слоя.

При использовании пористых материалов профиль давления в подшипниках улучшается из-за увеличения площади нагнетания газа в зазор подшипника. Поэтому, если вместо дискретного ограничения струи применить пористое ограничение, то при заданных геометрических параметрах подшипника это приводит к повышению его несущей способности. Основы теории и метод расчета подшипников с газовой смазкой разработаны С.А. Шейнбергом [3].

Выбор материала для газостатических опор представляет сложную техническую задачу.

Основные требования, предъявляемые к материалам подшипников с газовой смазкой, сводятся к следующим:

1) технологичность и возможность высокой точности и чистоты обработки;

2) стабильность и малый коэффициент трения (в момент касания сопряженных поверхностей при высоких скоростях);

3) невозможность сварки трением при кратковременных касаниях;

4) размерная и структурная стабильность материала;

5) соответствие коэффициентов линейного расширения материалов подшипниковой пары;

6) соответствующий и, как правило, высокий коэффициент теплопроводности;

7) достаточная прочность;

8) в некоторых условиях высокая теплостойкость и жаропрочность;

9) высокая химическая, коррозионная и эрозионная стойкость.

Выбор материала для газовых подшипников определяется многими факторами. Детали подшипников с газовой смазкой должны быть подобраны по коэффициенту термического расширения и более точно обработаны, чем детали подшипников с жидкой смазкой. Кроме того, они должны обладать наиболее совершенными характеристиками трения и износа, а также определенными прочностными и физико-механическими свойствами. Поэтому выбор материалов для деталей газовых подшипников приобретает первостепенное значение и выделяется в самостоятельную и сложную проблему, от решения которой зависит работоспособность подшипников.

Материалы пористых газовых подшипников должны иметь достаточную газопроницаемость, характеризуемую вполне определенным значением такого критерия, как коэффициент проницаемости. Пробное определение коэффициента проницаемости материала для пористых вкладышей газовых опор выполнено в соответствии с методикой, изложенной в монографии профессоров КнАГТУ А.В. Космынина и В.С. Виноградова [4].



Рис. 2. Конструкция турбонасоса с газостатическими опорами: 1 — входное приемное устройство; 2 — напорный патрубок; 3 — корпус; 4 — стакан; 5 — рабочее колесо турбины; 6 упорный гребень; 7 — специальная гайка; 8 — крышка; 9 сопловой канал; 10 — автомат безопасности; 11 — подводящая трубка; 12 — вал; 13 — радиально-упорный подшипник; 14 — радиальный подшипник; 15 — рабочее колесо насоса

Конструкция турбонасоса с пористыми опорами на воздушной смазке представлена на рис. 2.

Для восприятия радиальной нагрузки в конструкции ротора предусматриваются нижний радиальный 14 и верхний радиально-упорный 13 газостатические подшипники на воздушной смазке. Радиальная сила, действующая на рабочее колесо насоса, достигает своих максимальных значений при подачах, близких к нулю.

При работе турбонасоса с рабочей частотой вращения вала радиальная нагрузка практически отсутствует. Осевая сила, действующая на ротор насоса, воспринимается упорным подшипником. Функцию упорного подшипника выполняют упорный гребень *6*, выполненный заодно с валом *12*, и торцевая поверхность увеличенного диаметра верхней радиальной опоры, играющая роль подпятника.

Пористые вкладыши газовых опор 13 и 14 выполнены из графита. Поскольку подшипники работают при нормальных температурах, то закрепляют вкладыши в металлических обоймах вклеиванием (на эпоксидной смоле, бакелитовом лаке и др.).



Основная нагрузка на ротор насоса происходит в осевом направлении, поэтому наиболее нагружен во время работы верхний радиально-упорный газовый подшипник. Это обстоятельство предусматривает длительную обкатку турбонасоса в составе испытательного стенда.

Турбонасос предполагается использовать для откачивания преимущественно морской воды, поэтому требуется тщательная проработка конструкции уплотнения со стороны рабочего колеса насоса.

Расчетная оценка энергетических параметров модернизированного турбонасоса показала, что его КПД возрастает на 1,83 %. В связи с уменьшением мощности приводной турбины до значения, равного расчетной мощности насоса (2,5 кВт), снижается расход воздуха, приводящего ее в действие, что компенсирует дополнительную подачу сжатого воздуха на газовые опоры. Определение необходимого расхода воздуха для надежной работы газовых подшипников является еще одной оптимизационной задачей.

Применение газостатических опор с вкладышами из пористого материала вместо стальных шарикоподшипников обеспечит некоторое снижение массы турбонасоса.

#### Выводы

1. В судовых условиях, когда расход сжатого воздуха в опоры турбонасоса ограничивается определенными энергетическими затратами, выбор материала с установленной пористостью является оптимизационной задачей.

2. Техническое решение о замене подшипников качения газостатическими опорами с пористыми или частично пористыми вкладышами связано с проведением большого числа экспериментальных исследований модели турбонасоса на опытном стенде для выбора его работоспособной и надежной конструкции.

#### Библиографические ссылки

1. Эксплуатация судовых насосов / Б.П. Башуров и др. М.: Транспорт, 1989. 127 с.

2. Повышение эффективности работы центробежных насосов, находящихся в эксплуатации / А.В. Волков и др. // Новости теплоснабжения. 2010. № 10. С. 31–33.

3. Шейнберг С.А., Жедь В.П., Шишеев М.Д. Опоры скольжения с газовой смазкой. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1979.

4. Космынин А.В., Виноградов В.С. Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования. Владивосток: Дальнаука, 2002. 326 с.



### Современные технологии сборки

УДК 658.527.011

**А.А. Иванов,** д-р техн. наук (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева) *E-mail: ivanov\_aa@nntu.nnov* 

# Системы автоматической сортировки деталей на два транспортных потока

В производстве системы автоматической сортировки деталей на два потока используют для питания одновременно двух технологических машин из одного загрузочного устройства, а также для отбраковки из транспортного потока дефектных деталей. При этом в рабочую позицию машин подают две одинаковых детали с зеркальным расположением их относительно друг друга. Рассмотрены наиболее эффективные принципиальные схемы систем сортировки деталей на два транспортных потока.

In production the systems of the automatic sorting of details into two streams are used for simultaneous supply of two technological machines from one loading device as well as for rejection of defective parts from the transport stream. Where in two identical parts are supplied with mirror location relative to each other into working position. The most effective principal schemes of detail sorting systems into two transport streams are considered.

**Ключевые слова:** сортировка деталей; транспортный поток; загрузочное устройство.

Keywords: sorting of details, transport stream, loading device.

Процесс сортировки деталей на два транспортных потока можно отнести к одному из методов активной ориентации предметов обработки и сборки, осуществляемой в основном в непрерывном режиме, т.е. при их перемещении. В производстве системы сортировки используют для питания одновременно двух технологических машин из одного загрузочного устройства, а также для отбраковки из транспортного потока дефектных деталей. При этом в рабочую позицию машин подают две одинаковых детали с зеркальным расположением их относительно друг друга. В системах сортировки механизмы переориентации деталей чаще всего отсутствуют. Рассмотрим некоторые принципиальные схемы пневматических и магнитных систем сортировки деталей на два транспортных потока.

В пневматической системе сортировки колпачков 4 малой высоты последние по каналу 1 поступают в зону разделения, где установлены наклонные сопла 5 и 6 (рис. 1). Если колпачок поступает донышком к соплу 5, то под действием струи сжатого воздуха из сопла 6 он направляется в левый канал 2, а если колпачок оказывается донышком к соплу 6, то он попадает в правый канал 3.



Рис. 1. Схема сортировки деталей типа "низких колпачков": a — движение деталей по подводящему и отводящему каналам;  $\delta$  и в — движение колпачка в зависимости от его положения:  $\delta$  — донышком к соплу 5; в — донышком к соплу 6; 1 — подводящий канал; 2, 3 — левый и правый отводящие каналы; 4 — колпачок





Рис. 2. Схемы сортировки дисков с двусторонними кольцевыми канавками разного диаметра (*a*) и деталей с небольшой разницей в площади опорных поверхностей (*б*):

1, 4 – исполнительная и управляющая воздушные струи соответственно; 2 – диск с кольцевыми канавками; 3 – транспортер; 5 – канал; 6 – деталь с разницей в площади опорных поверхностей; 7 – сопло; 8 – пористая крышка пневмолотка; 9 – параллельный канал транспортного лотка

Сортировка более сложных деталей со слабо выраженными различиями в форме торцов, например дисков 2 с двусторонними кольцевыми канавками разного диаметра, осуществляется с помощью исполнительной *1* и управляющей *4* воздушных струй (рис. 2, *a*).

Если диск перемещается по транспортеру *3* вниз канавкой большего диаметра, то он проходит в зоне сопел беспрепятственно, так как сжатый воздух из управляющего сопла попадает в канал *5* через кольцевую канавку диска и отклоняет струю *1*. Когда диск проходит вниз канавкой меньшего диаметра, то управляющее сопло не совпадает с канавкой, струя из сопла *1* не отклоняется и сталкивает диск в параллельный канал.

Схема сортировки деталей с небольшой разницей в площади опорных поверхностей показана на рис. 2, б. Если деталь 6 перемещается на большей опорной поверхности, то она "всплывает" на воздушной прослойке над пористой крышкой пневмолотка 8. Благодаря этому она будет сброшена струей из сопла 7 в параллельный канал лотка 9. В противном случае деталь проходит под струей по основному каналу лотка.

Сортировка плоских асимметричных деталей производится с помощью воздушной струи на транспортном лотке с разделительной полкой путем регулирования давления воздуха, подводимого к исполнительному соплу.

Пусть пластина 1 движется по лотку 4 скошенной кромкой вперед (рис. 3, *a*). Проходя над соплом 2, передняя кромка приподнимается воздушной струей над разделительной полкой 3 и пластина попадает в верхний канал лотка 4. Ровная кромка пластины имеет большую массу и поэтому не поднимается над струей. Благодаря этому пластина беспрепятственно проходит под разделительной полкой и попадает в нижний канал лотка. Разница в массе кромок пластины определяется за счет подбора давления питания  $p_{\pi}$  сжатого воздуха, подводимого к соплу 2.

Аналогично производится сортировка пластин 7 с боковой фигурной кромкой (рис. 3,  $\delta$ ). При прохождении фигурной кромки над соплом 5 она приподнимается воздушной струей и пластина ложится на разделительную полку 8, проходя в верхний канал лотка  $\delta$ . Ровная кромка пластины имеет большую массу и проходит над соплом почти не поднимаясь.

Для ускорения движения пластин в верхнем канале транспортного лотка устанавливают еще одно сопло (на рис. 3 не показано) под небольшим углом к горизонту. Ускоренное движение пластин в нижнем канале достигается наклоном сопла 2 в направлении движения.

Система сортировки миниатюрных объектов типа полупроводниковых кристаллов 4 представляет собой пневмокамеру 2, установленную на упругих подвесках 1 вибропривода с электромагнитным возбудителем 6 вынужденных колебаний (рис. 4).

Кристаллы 4 по лотку 5 поступают на крышку 3 камеры, выполненную из пористой металлокерамики (например, титаната бария) с размером пор 5...20 мкм и общей пористостью 45 %. В герметич-



Рис. 3. Схемы сортировки плоских деталей со скошенной передней кромкой (*a*) и с боковой фигурной кромкой (*б*): *1* – пластина со скошенной передней кромкой; *2*, *5* – сопла; *3*, *8* – разделительные полки; *4* – лоток; *6* – верхний канал лотка; *7* – пластина с боковой фигурной кромкой



**Рис. 4.** Схема сортировки полупроводниковых кристаллов: *1* – упругие подвески; *2* – герметичная камера; *3* – крышка камеры; *4* – кристаллы; *5* – лоток; *6* – электромагнитный вибропривод

ную камеру 2 подается сжатый воздух, который выходит через микропоры крышки, образуя равномерно распределенную воздушную прослойку между поверхностью крышки и опорной плоскостью кристаллов. Пневмокамере 2 от вибропривода 6 сообщаются гармонические колебания частотой 50 Гц в направлении продольной оси.

Давление воздуха, подаваемого в камеру, подбирают таким, чтобы кристаллы, обращенные к крышке большей плоскостью, приподнимались над крышкой на воздушной прослойке, а кристаллы, контактирующие с крышкой меньшей плоскостью, оставались на ее поверхности. Под действием вибрации кристаллы, лежащие на крышке, перемещаются вправо, а кристаллы на воздушной прослойке — влево под действием составляющей силы тяжести (для этого пневмокамеру устанавливают на рессорах с небольшим наклоном).

Эффект Бернулли, в основе которого лежит эжектирующее действие воздушного потока, протекающего с высокой скоростью в узком канале, успешно используют в процессах сортировки деталей, так как воздушная струя, образующая в щелевом потоке зону пониженного давления, действует на деталь избирательно [1, 2].

Рассмотрим применение эффекта Бернулли на примере сортировки дисков с односторонней фаской (рис. 5).

Пусть диск 4 скатывается по наклонному лотку *1* и попадает под действие воздушной струи, вытекающей из сопла 2. За зоной сортировки установ-



Рис. 5. Схема сортировки дисков с односторонней фаской струей сжатого воздуха:

a – диск опрокидывается при попадании струи в фаску;  $\delta$  – диск не опрокидывается при попадании струи в ребро; 1 – наклонный лоток; 2 – сопло; 3 – разделительная стенка; 4 – диск

лена разделительная стенка 3, которая делит гравитационный лоток 1 на два канала. Если диск приходит фаской к соплу, то он опрокидывается струей на противоположную стенку лотка и попадает в параллельный основному канал, отделенный от него стенкой 3 (рис. 5, *a*). Диски, расположенные фаской от сопла, не опрокидываются струей и проходят в основной канал (рис. 5,  $\delta$ ). При этом необходимо, чтобы струя не попадала в плоскость основания диска. В этом случае струя, растекаясь по поверхности диска, образует между стенкой лотка и деталью зону пониженного давления. Когда струя действует на фаску, она может захватывать часть боковой поверхности диска, так как это не мешает процессу опрокидывания детали.

Второй пример связан с сортировкой пластин с односторонней полостью. Пластины 3 (например, керамические платы микросхем) транспортируются по наклонной стенке V-образного лотка 2, в котором установлено сопло 1 (рис. 6).

При движении пластины полостью к соплу воздушная струя опрокидывает ее на противоположную стенку лотка (рис. 6,  $\delta$ ), а при движении полостью от сопла за счет эффекта Бернулли деталь поджимается к стенке и проходит дальше (рис. 6,  $\theta$ ).

Подобная система позволяет сортировать плоские детали с односторонней выемкой на кромке и с различной шероховатостью поверхностей.

Сортировка пластин с полукруглым вырезом на кромке выполняется с учетом разницы в площадях





**Рис. 6. Сортировка пластин с односторонней выемкой:** *a* – пластина; *б* – движение пластины полостью к соплу; *в* – движение пластины полостью от сопла; *1* – сопло; *2* – V-образный лоток; *3* – пластина с односторонней полостью; *p*<sub>п</sub> – давление питания сжатого воздуха

взаимодействия струи с поверхностью пластины в момент совмещения передней ее кромки с центром сопла (рис. 7). Площадь взаимодействия и, следовательно, подсасывающая сила при совмещении сопла с вырезом больше, чем при совмещении его с ровной кромкой. Поэтому пластина, ориентированная вырезом вперед, проходит мимо сопла нормально, а пластина с ровной передней кромкой опрокидывается струей на противоположную стенку транспортного лотка.

Как показывает скоростная киносъемка процесса сортировки таких пластин, в определенных диапазонах изменения скорости движения детали  $v_{a}$  и максимального давления  $\Delta p$  наблюдается отклонение пластины при начальном перекрытии сопла кромкой с вырезом и затем прижимание ее к наклонной стенке лотка. При скорости движения детали в пределах 0,10...0,15 м/с диапазон максимального давления составит 16,7...26,8 кПа [2].



Рис. 7. Эпюры действия воздушной струи на разные кромки при сортировке пластин с односторонней выемкой:

*а* – пластина; б и *в* – действие струи при различном положении пластин



**Рис. 8. Действие струи на рифленую поверхность пластины:** *a* – пластина; *δ* – действие струи на поверхность пластины; *l* – пластина; *2* – рифленая поверхность

В заключение по группе пневматических систем рассмотрим процесс сортировки симметричных плоских деталей с различной степенью шероховатости ее плоскостей. Наличие множества микровыступов и впадин на шероховатой плоскости пластины образует как бы рифленую поверхность и приводит к увеличению давления струи на нее (рис. 8). Благодаря этому пластина, обращенная к соплу шероховатой плоскостью, опрокидывается струей на противоположную стенку лотка.

Чтобы пластина, обращенная к соплу гладкой плоскостью, не опрокидывалась струей, необходимо правильно задать значения  $v_{\pi}$  и  $\Delta p$ .

Из приведенных примеров видно, какие сложные функции распознавания и исполнения может выполнять обычная воздушная струя.

В основе магнитных систем сортировки, как и пневматических, лежат методы активной ориентации, однако механизмы переориентации объектов в них чаще всего отсутствуют. Представим некоторые принципиальные схемы сортировки объектов с использованием магнитного поля.

Система сортировки транзисторов 2 с односторонней ферромагнитной пластиной 3 представляет собой вибролоток 1, в зоне разветвления которого с обеих сторон установлены постоянные магниты 4 одноименными полюсами один напротив другого (рис. 9). Предварительная ориентация транзисторов осуществляется путем западания выводов в прорезь транспортного лотка 1. Транзисторы с различной ориентацией по пластине 3 непрерывным



Рис. 9. Схема сортировки транзисторов с односторонней ферромагнитной пластиной на два потока:

a — транзистор;  $\delta$  — схема сортировки; 1 — вибролоток; 2 — транзистор с ферромагнитной пластиной; 3, 4 — постоянные магниты; 5 — отводные лотки

потоком поступают по вибролотку к сортирующим магнитам 4, где они разделяются на два потока. Транзисторы 2 отклоняются от прямолинейного движения за счет притяжения ферромагнитной пластины 3 к тому или иному магниту 4 и принудительно вводятся в соответствующий отводной лоток 5.

Задача сортировки цилиндрических ступенчатых 4 и конических 5 валиков с различными магнитными массами на концах решается с помощью магнитной системы, которая содержит две индуктивные катушки 3 с магнитопроводом 2, к внутренним полостям которых присоединены отводные транспортные лотки 1 (рис. 10). Деталь поступает в зону сортировки, затем на катушки 3 подается импульс тока, в результате чего деталь втягивается в катушку более массивным концом. Длительность импульса выбирают такой, чтобы катушка выключалась в момент входа детали в ее полость. Дальнейшее движение детали по отводному лотку 1 происходит по инерции.



Рис. 10. Схемы сортировки цилиндрических (*a*) и конических (*б*) асимметричных валиков с помощью втяжных магнитов: *1* – транспортные лотки; *2* – магнитопровод; *3* – катушки; *4* – ступенчатый валик; *5* – конический валик

#### Вывод

Рассмотрены наиболее эффективные принципиальные схемы пневматических и магнитных систем сортировки деталей на два транспортных потока. Приведенные примеры показывают, что подобные системы сортировки целесообразно использовать для питания одновременно двух технологических машин из одного загрузочного устройства, а также для отбраковки из транспортного потока дефектных деталей. При этом в рабочую позицию машин должны подаваться две одинаковых детали с зеркальным расположением их относительно друг друга.

#### Библиографический список

1. **Иванов А.А.** Автоматизированные сборочные системы: учебник. Н. Новгород: НГТУ, 2007. 347 с.

2. **Иванов А.А.** Теоретические основы процессов манипулирования объектами обработки и сборки. Н. Новгород: НГТУ, 2009. 257 с.





УДК 621.757

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

### Фазовый портрет способа автоматизированной сборки, осуществляющего стабилизацию движения детали относительно поисковой траектории

Разработана математическая модель способа автоматизированной сборки, реализующего стабилизацию движения детали относительно поисковой траектории. Построены фазовые портреты относительного и углового совмещения для способа автоматизированной сборки, осуществляемого на базе робота с параллельной кинематикой.

The mathematical model of automated assembly technique is developed. The technique realizes stabilization of parts movement relatively to search trajectory. Phase portraits of relative and angular overlapping of parts for offered automated assembly technique are built.

**Ключевые слова:** автоматизированная сборка, адаптация положения, имитационное моделирование, способ стабилизации движения детали, фазовый портрет.

**Keywords:** automated assembly, position adaptation, simulation, technique of part movement stabilization, phase portrait.

#### Введение

Сущность классического понятия фазового пространства заключается в том, что состояние сколь угодно сложной системы представляется в нем точкой, а изменение во времени этой системы – перемещением этой точки. Способы и средства автоматизированной сборки, являясь динамическими системами, могут быть исследованы с помощью метода фазовой плоскости [1]. Однако на данный момент не для всех устройств, и тем более способов, разработаны их математические модели, потребность в создании которых обусловлена отсутствием возможности регистрации перемещений соединяемых деталей и их производных экспериментальным путем. Возможности имитационного моделирования позволяют "заглянуть под оболочку" системы автоматизированной сборки и сконцентрироваться лишь на том, что объединяет все средства сборки – эволюционирование во времени и пространстве системы: охватывающая деталь - охватываемая деталь.

В статье рассмотрены вопросы представления на фазовой плоскости одного из способов автоматизированной сборки,

на примере способа стабилизации движения детали относительно поисковой траектории.

### 1. Способ стабилизации движения детали относительно поисковой траектории: этапы

Способ может быть осуществлен сборочным устройством [1], построенным на базе робота с тремя параллельными кинематическими цепями, оснащенного единым модулем базирования для обеих соединяемых деталей, средством адаптации положения охватываемой детали (втулки), средством адаптации положения охватываемой детали (вала), средствами транспортировки деталей в зону сборки. Трехмерная модель устройства для сборки осесимметричных деталей, осуществляющего рассматриваемый способ, представлена на рис. 1. Конструкция, этапы функционирования, методика расчета, алгоритмы управления, математическое моделирование сборочного устройства подробно изложены в работах [2 – 4].



Рис. 1. Трехмерная модель роботизированного сборочного устройства, реализующего способ стабилизации движения детали относительно поисковой траектории

Построение фазового портрета рассматриваемого способа и устройства, реализующего его, осуществляется в несколько шагов, соответствующих этапам сборочной операции. Последовательность анализа динамики движения соединяемых деталей следующая:

1) транспортный этап;

- 2) адаптация положения охватываемой детали (вала);
- 3) адаптация положения охватывающей детали (втулки);
- 4) совмещение сборочных компонент.

#### 2. Этап транспортировки охватываемой детали по гибкому питателю

Исследуем динамику движения охватываемой детали (вала) на транспортном этапе. Динамическая модель процесса транспортировки охватываемой детали по гибкому питателю в процессе отработки подвижной платформой сборочного робота поискового маневра [2] с целью захвата и адаптации охватывающей детали (втулки) представлена на рис. 2.

При движении охватываемой детали 1 массой m по гибкому питателю 2 в процессе транспортировки на нее действуют:

 $m\vec{g}$  — сила тяжести;

*N* – сила реакции в зоне контакта;

 $F_{\rm TD}$  – сила трения скольжения.

Перемещение  $\vec{q}$ , совершаемое деталью, определяется действием результирующей силы  $F_{\rm дв}$ , значение которой зависит от траектории 4 движения подвижной платформы 3 сборочного робота и, следовательно, от следующих параметров:

H – расстояние от начала траектории движения детали в точке  $O_1$  до плоскости подвижной платформы *XOY*;

 $\alpha$  – угол наклона вектора  $\vec{q}$  к плоскости *XOY*;

 $\beta$  — угол между осью *OX* и проекцией на плоскость *XOY* вектора  $\vec{q}$  в точке  $O_2(x_0, y_0, z_0)$ , соответствующей центру подвижной платформы, совершающей поисковый маневр.

В простейшем случае динамика движения детали описывается дифференциальным уравнением вида:  $m\ddot{q} + b\dot{q} = F_{_{\rm AB}}$ , где  $\ddot{q}$  и  $\dot{q}$  – вторая и первая производные координаты относительной адаптации q, b – коэффициент вязкого трения.

Однако сам гибкий питатель, основанием совмещенный с подвижной платформой в центре  $O_2(x_0, y_0, z_0)$ , представ-



Рис. 2. Динамическая модель транспортного этапа охватываемой детали (вала), перемещающейся по гибкому питателю в процессе отработки сборочным роботом поискового маневра: 1 – охватываемая деталь; 2 – гибкий питатель; 3 – подвижная платформа; 4 – траектория движения платформы

ное движение в пространстве в процессе совершения сборочным роботом поискового маневра с целью захвата и адаптации охватывающей детали (вала), ориентированной на сборочной позиции с некоторой неопределенностью по координатам *x* и *y*. С учетом динамики движения подвижной платформы сборочного робота дифференциальные уравнения, описывающие движение детали на этапе транспортировки, приобретают коэффициенты, зависящие от множества переменных факторов, что значительно затрудняет процесс отыскания решения.

Уравнение, описывающее движение охватываемой детали (вала) в перемещающемся гибком питателе по координатам  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$ , имеет вид:

 $+b[\dot{q}_x + q_x(\dot{\alpha}tg\alpha + \dot{\beta}tg\beta)] = mg\sin\alpha\cos\alpha\cos\beta;$ 

$$m[\ddot{q}_{y} + 2\dot{q}_{y}[\dot{\alpha}(tg\alpha + 1) - 2\dot{\beta}ctg\beta] + q_{y}[\dot{\alpha}^{2}\left(\frac{1}{\cos^{2}\alpha} + tg^{2}\alpha\right) + \dot{\beta}^{2}\left(\frac{1}{\sin^{2}\beta} - ctg^{2}\beta\right) - \dot{\alpha}\dot{\beta}(1 + tg\alpha)ctg\beta + \ddot{\alpha}tg\alpha - \ddot{\beta}ctg\beta] + (1)$$

 $+b[\dot{q}_{y} + q_{y}(\dot{\alpha}tg\alpha - \beta ctg\beta)] = mg\sin\alpha\cos\alpha\sin\beta;$ 

$$m\{\ddot{q}_z - 2\dot{q}_z\dot{\alpha}\operatorname{ctg}\alpha + q_z[\dot{\alpha}^2(1 + 2\operatorname{ctg}^2\alpha) - \ddot{\alpha}\operatorname{ctg}\alpha]\} + b[q_z - q_z\dot{\alpha}\operatorname{ctg}\alpha] = mg\sin^2\alpha\cos\alpha$$

ляет собой весьма нестабильную поверхность для транспортировки охватываемой детали (вала), совершающую слож-

Расчетные зависимости, необходимые для перехода от координат подвижной платформы робота  $x_0, y_0, H$ , совер-

шающей перемещение по поисковой траектории, т.е. маневр, к координатам движения детали в гибком питателе  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$  имеют вид:

$$(K p^2 + L p + M)q_z = mg\sin^2\alpha\cos\alpha,$$

$$\begin{cases} tg\alpha = \frac{H}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}; \sin\alpha = \frac{H}{\sqrt{H^2 + x_0^2 + y_0^2}}; \cos\alpha = \sqrt{\frac{x_0^2 + y_0^2}{H^2 + x_0^2 + y_0^2}}; tg\beta = \frac{y_0}{x_0}; \sin\beta = \frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}; \cos\beta = \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}}; \\ tg\beta = \frac{x_0}{y_0}; \quad \dot{\alpha} = \frac{-H(y_0\dot{y}_0 + x_0\dot{x}_0)}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}(H^2 + x_0^2 + y_0^2)}; \\ \ddot{\alpha} = \frac{-H(\dot{y}_0^2 + y_0\ddot{y}_0 + \dot{x}_0^2 + x_0\ddot{x}_0)(H^2 + x_0^2 + y_0^2)\sqrt{x_0^2 + y_0^2} + H(y_0\dot{y}_0 + x_0\dot{x}_0)[(x_0^2 + y_0^2)^{-\frac{1}{2}}(y_0\dot{y}_0 + x_0\dot{x}_0) \times (x_0^2 + y_0^2)(H^2 + x_0^2 + y_0^2)^2}{(x_0^2 + y_0^2)(H^2 + x_0^2 + y_0^2)^2} \quad \dots \rightarrow \frac{\times(H^2 + x_0^2 + y_0^2) + 2\sqrt{x_0^2 + y_0^2}(y_0\dot{y}_0 + x_0\dot{x}_0)]}{(x_0^2 + y_0^2)(H^2 + x_0^2 + y_0^2)^2}; \\ \dot{\beta} = \frac{\dot{y}_0x_0 - y_0\dot{x}_0}{x_0^2 + y_0^2}; \quad \ddot{\beta} = \frac{(\ddot{y}_0x_0 - y_0\ddot{x}_0)(x_0^2 + y_0^2) - 2(\dot{y}_0x_0 - y_0\dot{x}_0)(x_0\dot{x}_0 + y_0\dot{y}_0)}{(x_0^2 + y_0^2)^2}. \end{cases}$$

Для удобства решения системы (1) осуществим замену, преобразовав дифференциальные уравнения по координатам  $q_x$ ,  $q_y$ ,  $q_z$  к виду:

• для  $q_x$  имеем дифференциальное уравнение 2-го порядка с коэффициентами *A*, *B*, *C*:

$$A\ddot{q}_x + B\dot{q}_x + Cq_x = mg\sin\alpha\cos\alpha\cos\beta$$
или

$$(A p^{2} + B p + C)q_{x} = mg \sin \alpha \cos \alpha \cos \beta,$$

где

$$\begin{cases}
A = m; \\
B = 2m(\dot{\alpha} tg\alpha + \dot{\beta} tg\beta) + b; \\
C = m[\dot{\alpha}^{2} \left(\frac{1}{\cos^{2} \alpha} + tg^{2} \alpha\right) + \dot{\beta}^{2} \left(\frac{1}{\cos^{2} \beta} + tg^{2} \beta\right) + \\
+ \ddot{\alpha} tg\alpha + \ddot{\beta} tg\beta + 2\dot{\alpha}\dot{\beta} tg\alpha tg\beta] + b(\dot{\alpha} tg\alpha + \dot{\beta} tg\beta);
\end{cases}$$
(3)

• для  $q_y$  имеем дифференциальное уравнение 2-го порядка с коэффициентами *D*, *E*, *F*:

 $D\ddot{q}_{y} + E\dot{q}_{y} + Fq_{y} = mg\sin\alpha\cos\alpha\sin\beta$ или  $(Dp^{2} + Ep + F)q_{y} = mg\sin\alpha\cos\alpha\sin\beta,$ 

где

$$\begin{cases} D = m; \\ E = 2m[\dot{\alpha}(tg\alpha + 1) - 2\dot{\beta}ctg\beta] + b; \\ F = m[\dot{\alpha}^{2}\left(\frac{1}{\cos^{2}\alpha} + tg^{2}\alpha\right) + \dot{\beta}^{2}\left(\frac{1}{\sin^{2}\beta} - ctg^{2}\beta\right) - (4) \\ -\dot{\alpha}\dot{\beta}(1 + tg\alpha)ctg\beta + \ddot{\alpha}tg\alpha - \ddot{\beta}ctg\beta] + \\ + b(\dot{\alpha}tg\alpha - \dot{\beta}ctg\beta); \end{cases}$$

• аналогично для  $q_z$  имеем  $K\ddot{q}_z + L\dot{q}_z + Mq_z = mg\sin^2\alpha\cos\alpha;$ 

где

$$\begin{cases} K = m; \\ L = 2m\dot{\alpha}\operatorname{ctg}\alpha + b; \\ M = m[\dot{\alpha}^{2}(1 + 2\operatorname{ctg}^{2}\alpha) - \ddot{\alpha}\operatorname{ctg}\alpha] - b(\dot{\alpha}\operatorname{ctg}\alpha). \end{cases}$$
(5)

На основании приведенных зависимостей (1)–(5) получена математическая модель транспортного этапа охватываемой детали (вала), перемещающейся по гибкому питателю в процессе отработки сборочным роботом поискового маневра (рис. 3).

Модель робота с параллельными кинематическими цепями, особенности моделирования и результаты отработки поискового маневра подробно изложены в работах [1–3]. Значения исходных данных при моделировании: масса охватываемой детали m = 0,15 кг;  $b = 0,1 \frac{\text{с} \cdot \text{H}}{\text{м}}$ . Переменными величинами являются параметры  $x_0, y_0, H$  – координаты центра подвижной платформы сборочного робота, изменяющиеся во времени в процессе отработки поискового маневра. Результатами моделирования транспортного этапа для охватываемой детали являются зависимости  $q_x(t), q_y(t),$  $q_z(t)$ , описывающие изменение относительных координат во времени, и их первые производные  $-\frac{dq_x}{dt}, \frac{dq_y}{dt}, \frac{dq_z}{dt}$ .

#### Этап адаптации положения охватываемой детали в ориентирующем модуле с нелинейным профилем

Проанализируем процесс адаптации положения охватываемой детали (вала) на выходе из гибкого питателя при попадании в единый модуль базирования, место сопряжения которых имеет нелинейный профиль ориентирующей поверхности. Трехмерная модель этого процесса представлена на рис. 4.

Данный процесс представляет собой сочетание относительной адаптации по координате  $q_z$  и угловой адаптации по координате  $\varphi$ . Особенности процесса углового ориентирования подробно изложены в работе [1]. Однако исследо-



Рис. 3. Математическая модель транспортного этапа охватываемой детали (вала), перемещающейся по гибкому питателю в процессе отработки сборочным роботом поискового маневра

вание затрагивало лишь случай, когда значение зазора между ориентирующей и охватывающей поверхностями деталей вдоль координаты совмещения было неизменным. В некотором приближении результаты, полученные в работе [1], могут быть применены и для ориентирующей поверхности с нелинейным профилем, если допустимо разбиение гладкой нелинейной функции на дискретные участки  $\Delta z_k$ , протяженность которых определяется расстоянием между точками контакта детали с поверхностью:  $\Delta z_k = C_{k-1} - C_k$ , причем на протяжении всего интервала  $\Delta z_k$  значение зазора считается неизменным. В результате данного разбиения получим замену непрерывной функции F(z), описывающей нелинейный профиль ориентирующей поверхности модуля, дискретной функцие  $-F(c_k)$ .

На рис. 4 введены обозначения:

*a<sub>z</sub>* – внутренний диаметр ориентирующего модуля;

 $\Delta(z)$  — значение зазора между сопрягаемой поверхностью охватываемой детали и поверхностью ориентирующего модуля нелинейного профиля;  $\varphi_k$  — значение предельного углового перемещения охватываемой детали;

 $C_k$  — точки контакта детали с поверхностью ориентирующего модуля.

Для угловых перемещений охватываемой детали, определяющих предельные положения точек траектории движения, получены следующие зависимости:

$$\varphi_{k} = \arctan\left[\sqrt{(k-1)\delta(2-\delta)} \frac{\sqrt{\frac{k}{k-1}}(1-\delta)\pm 1}{1-k\delta(2-\delta)}\right]; \ k = 1, \ 2, \ 3, \dots n, (6)$$

где  $\delta = \frac{\Delta}{a}$  — относительное значение гарантированного зазора.

Поступательное перемещение охватываемой детали может быть определено по наибольшему расстоянию от верх-



Рис. 4. Процесс адаптации охватываемой детали в ориентирующем модуле с нелинейным профилем:

1 – траектория движения

ней плоскости ориентирующего модуля до точки контакта с деталью. Эти расстояния имеют следующие значения:

$$q_{z_k} = a\sqrt{(k-1)\delta(2-\delta)}.$$
(7)

После проведения расчетов дискретных параметров  $\varphi_k$  и  $q_{z_k}$  с последующей сплайн-интерполяцией на ЭВМ были получены графические зависимости  $\varphi(t)$  и  $\frac{d\varphi}{dt}$  [1], описы-

вающие процесс изменения координат относительной и угловой адаптации положения охватываемой детали в ориентирующем модуле, необходимые для воспроизведения участка траектории фазового портрета. Процесс адаптации характеризуется чередованием знака координат, что соответствует попеременным соударениям детали о правую и левую поверхности модуля, являющимся следствием "отскакивания" детали при ударе со значительной скоростью. Если при выходе из гибкого питателя деталь имела бы меньшую скорость, то процесс угловой адаптации представлял собой соскальзывание по ориентирующей поверхности. В обоих случаях значение угловой координаты ф на выходе из ориентирующего модуля должно удовлетворять условию:  $\phi < \phi_f$ или  $\phi < \arctan f$ , т.е.  $\phi_f = \arctan f$ , где  $\phi_f -$ угол трения; f -коэффициент трения. Невыполнение данного условия может привести к заклиниванию детали в ориентирующем модуле.

#### 4. Построение фазовых портретов относительного и углового совмещения деталей для способа стабилизации движения детали относительно поисковой траектории, реализуемого сборочным роботом с параллельной кинематикой

При построении фазовых портретов относительного и углового совмещения деталей для способа стабилизации

движения детали относительно поисковой траектории, реализуемого сборочным роботом с параллельной кинематикой, потребовалось объединение результатов моделирования следующих этапов:

транспортирования охватываемой детали (вала) по гиб-кому питателю;

адаптации положения охватываемой детали (вала) в ориентирующем модуле с нелинейным профилем единого модуля базирования деталей;

адаптации положения и транспортирования на сборочную позицию охватывающей детали (втулки) захватным устройством призматического типа;

сопряжения обеих соединяемых деталей в процессе их транспортироания на следующую технологическую позицию.

Этап адаптации положения охватывающей детали в устройстве адаптации призматического типа, соответствующая ему математическая модель и результаты имитационного моделирования динамики движения детали изложены в работах [1, 4], поэтому в рамках данной статьи не представлены. Так как моделирование проводили с помощью средств программного комплекса Matlab, то процесс сопряжения отдельных фазовых траекторий, соответствующих отдельным этапам сборочной операции, в единый графический образ не представляет особых сложностей. Результаты моделирования фазовых портретов представлены на рис. 5.

Анализ динамических процессов, описывающих поведение охватывающей и охватываемой деталей на различных этапах операции сборки, выявил необходимость расширения области рассматриваемых фазовых координат совмещения. Фазовые портреты строили по трем координатам относительного совмещения  $-q_x, q_y, q_z$  – и по одной координате углового совмещения ф. Весьма необычный результат получен на фазовом портрете относительного совмещения по координате  $q_x$ , который характеризуется существованием двух фазовых траекторий, соответствующих динамическим процессам охватываемой (1) и охватывающей деталей (2). Ранее проводимые исследования способов автоматизированной сборки на фазовой плоскости [5] свидетельствовали об отсутствии движения одной из собираемых деталей, что соответствовало вырождению её фазовой траектории в точку. Это было одним из необходимых условий автоматизированного совмещения. Однако рассматриваемый способ сборки, осуществляющий стабилизацию движения детали относительно программной траектории совмещения, является исключением.

Фазовый портрет отражает следующее: в момент времени t = 0 соединяемые детали находятся на значительном расстоянии. Устройство формирует одновременно управляющие воздействия не только на первую, но и на вторую детали. Способ характеризуется значительными границами зоны относительной адаптации, определяемыми конструктивными параметрами устройства (1 - 10d). Следует отметить, что при скоростях, меньших порогового значения, ориентирование детали не осуществимо. Отличием данного способа от рассмотренных ранее является реализация этапа совмещения сборочных компонент при скоростях движения устройства, отличных от нуля, при этом зона допустимого рассогласования по скорости имеет значительный диапазон.

Выполнение этапа сопряжения сборочных компонент в процессе движения устройства свидетельствует о возможно-



Рис. 5. Результаты моделирования фазовых портретов относительного и углового совмещения для способа автоматизированной сборки, осуществляемого на базе робота с параллельной кинематикой:

 $a - фазовый портрет относительного совмещения по координате <math>q_x$ ;  $\delta - фазовый портрет относительного совмещения по координате <math>q_y$ ;  $s - фазовый портрет относительного совмещения по координате <math>q_z$ ;  $z - фазовый портрет углового совмещения по координате <math>q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый портрет углового совмещения по координате  $q_z$ ;  $z - \phi$ азовый

сти одновременного выполнения этапа транспортирования готовой сборочной единицы. Итак, рассматриваемый способ, наглядно представленный на фазовой плоскости, характеризуют значительные размеры зоны относительной адаптации, возможность совмещения этапов транспортирования детали и ее адаптации, а также этапа совмещения сборочных компонент с этапом транспортирования готовой сборочной единицы на следующую технологическую позицию.

#### Заключение

Данная статья раскрывает возможности использования метода фазовой плоскости для анализа средств и способов автоматизированной сборки. В результате проведенной работы путем имитационного моделирования получены фазовые портреты относительного и углового совмещения сборочных компонент для способа автоматизированной сборки, осуществляющего стабилизацию движения детали относительно поисковой траектории. Моделирование в фазовой плоскости каждого последующего средства автоматизированной сборки или способа в целом позволит шаг за шагом приблизиться к созданию единой методологии их анализа.

#### Библиографический список

1. Симаков А.Л., Кузнецова С.В. Методы и средства автоматизированной сборки: представление в фазовом пространстве. Ковров: КГТА, 2013. 176 с.

2. Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Устройство для сборки осесимметричных деталей на базе манипулятора с параллельной кинематикой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 8. С. 3–15.

3. **Кузнецова С.В.** Моделирование движения дельта-робота по программной траектории // Автоматизация в промышленности. 2011. № 6. С. 17–21.

4. **Кузнецова С.В., Симаков А.Л.** Математическая модель процесса адаптации положения детали при автоматизированной сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5. С. 15–20.

5. **Кузнецова С.В., Симаков А.Л.** Фазовые портреты относительного и углового совмещения деталей при автоматизированной сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 2. С. 12–20.

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ

#### УДК 621.7

В.А. Адакин (Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина) E-mail: AWA-adakin@yandex.ru

### Обеспечение точности прямоугольных шлицевых профилей на валах при многопроходном холодном пластическом формообразовании

Исследована геометрическая точность прямобочных шлицевых профилей на валах при холодном пластическом деформировании. Получено выражение по определению крутящего момента со стороны накатной головки на шлицевую часть вала при накатывании шлицевых профилей. Проведена опытно-промышленная проверка применения покрытия TiZrN на накатных роликах с целью снижения контактного коэффициента трения.

Investigated the geometrical accuracy rectangulars spline profiles on the shafts at cold plastic deformation. The calculation of torque from rolling heads, slotted part of the shaft with rolling spline profiles. Conducted experimental-industrial testing applications trailer clips, film-coated TiZrN to reduce the contact friction forces.

Ключевые слова: пластическое деформирование, точность, толщина шлиц, параллельность шлиц, шлицевый вал.

**Keywords:** plastic deformation, accuracy, spline thickness, parallelism of splines, splined shaft.

**В** современном машиностроении большая роль отводится точности и качеству изготовления деталей машин. Качество изготовленных деталей оказывает влияние на их эксплуатационные свойства. В машиностроении показатели качества изделий весьма тесно связаны с точностью обработки деталей машин. Полученные при обработке размер и форма поверхности определяют фактические зазоры и натяги в сопряжениях деталей машин. Особенно это важно для подвижных тяжело нагруженных сопряжений, где отклонения от геометрических параметров приводят к тяжелым последствиям.

Поверхности сложной формы, такие как шлицевый профиль, получают в большинстве случаев резанием. Этот метод довольно трудоемок и составляет 50...70 % трудоемкости всей механической обработки. При этом качество обработанных изделий невысокое, недостаточна стабильность размеров, что в итоге вызывает погрешности размеров.

Формообразование поверхностей пластическим деформированием в холодном состоянии имеет большие преимущества над процессом резания [1, 2]. Одним из видов формообразования является продольное накатывание шлицевых профилей на валах в холодном состоянии.

При холодном накатывании шлицевых профилей значительно уменьшаются отходы металла в стружку, снижаются затраты труда, сокращается расход электроэнергии, высвобождаются металлорежущие станки и производственные площади, повышается производительность (в 6—15 раз относительно фрезерования). По механическим свойствам валы с накатанными шлицами приближаются к валам, подверженным термической обработке, при этом у валов, не подверженных термообработке, геометрические параметры не изменяются, они имеют лучшую структуру металла, обладают более высокими механическими свойствами и эксплуатационными качествами [3].

Несмотря на преимущества, широкое внедрение в производство холодного накатывания шлицевых валов многороликовой головкой сдерживается невысокой точностью шлиц, низкой стойкостью инструмента и невозможностью применения в мелкосерийном и единичном производстве из-за сложности конструкции и высокой стоимости накатной головки.

Многопроходное холодное накатывание прямоугольных шлицевых профилей используют при массовом производстве карданных валов автомобилей УАЗ. При этом холодное накатывание принципиально новый технологический процесс получения шлицевых профилей на валах, являющийся финишной операцией, без дополнительной размерной обработки. Шлицевая часть карданных валов представляет собой подвижное соединение, передающее крутящий момент, работающее в условиях абразивного изнашивания. Качество поверхности шлицевых профилей и их геометрическая точность определяют эксплуатационную надежность карданных валов [4].

Погрешности, возникающие при продольном накатывании шлицев, можно подразделить на три группы [4]: погрешности заготовки, выбранной технологии (метода) и оборудования.

К первой группе погрешностей относятся: биение заходной фаски вала, отклонения диаметра под накатывание и опорного торца, отклонения перпендикулярности опорного торца относительно оси центров заготовки, перепад твердости в осевом и поперечном сечениях вала, между партией деталей, а также качество и точность центров.

Данную группу погрешностей частично компенсируют внесением изменений в конструкцию шлицевого вала опорного неподвижного центра – созданием в нем сферического упора [5]. Данный сферический упор позволяет компенсировать неточности изготовления заготовки путем самоустановки заготовки в центрах в первоначальный момент касания ее накатными роликами.

Твердость заготовки в различных сечениях оказывает большое влияние на точность получаемых профилей [3]. Особое влияние оказывает "пятнистая" твердость, так как она не предсказуема и может находиться в любой части сечения заготовки. При накатывании ролик испытывает сопротивление со стороны участка с повышенной твердостью и отклоняется в сторону меньшей твердости, что влечет отклонение от геометрических параметров шлиц. При низкой твердости всего вала (менее 150 HV), в связи с малым его сопротивлением, происходит закручивание шлицевой части и отклонение всех размеров от номинальных. При высокой твердости (свыше 210 HV) резко возрастает сила деформирования и снижается стойкость инструмента. В связи с этим рекомендуемая твердость заготовки под накатывание 156...207 HV.

Применительно к шлицевому профилю карданных валов автомобилей УАЗ отклонения от номинальных размеров должны соответствовать 7–8-му квалитетам точности по ГОСТ 1139–80, в реальности данные отклонения соответствуют 9–10 квалитетам. При накатывании шлицевых профилей на валах необходимо, чтобы параллельность шлиц относительно оси вращения находилось в поле допуска ГОСТ 1139—80. При этом точность шлицевых профилей вала зависит от точности сопряжений комплектующих накатной головки (погрешности оборудования).

При отклонении шлицевых профилей от геометрических размеров происходит заклинивание подвижного сопряжения и выход его из строя. Во избежание этого необходимо выполнение условия: возмущающий момент со стороны накатной головки  $M_{\phi}$  должен быть меньше момента сопротивления вала кручению  $M_{\kappa}$ , рассчитываемого по формуле

$$M_{\kappa} = \frac{\pi \gamma_{\rm B} J_{\rm p} G}{180 l} , \qquad (1)$$

где  $\gamma_{\scriptscriptstyle B}$  — угол закручивания вала, град;

 $J_p$  — полярный момент инерции сечения, м<sup>4</sup>; G — модуль упругости при сдвиге, Па (для стали  $G = 8.2 \cdot 10^{10}$  Па);

*l* – длина участка закручивания вала, м.

Полярный момент инерции сплошного круглого сечения определяется из выражения

$$J_p \cong 0, 1 D^4 , \qquad (2)$$

где *D* – внешний диаметр вала, м.

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим расчетное выражение для определения момента сопротивления шлицевого вала кручению:

$$M_{\kappa} = \frac{0.1 \,\pi \gamma_{\rm B} D^4 G}{180 \,l} \,. \tag{3}$$

Из полученного выражения видно, что момент сопротивления кручению вала будет зависеть от диаметра вала, длины шлицевой части и угла закручивания вала шлиценакатной головкой.

Рассматривая схемы накатывания и угла закручивания (рис. 1, 2), в которых на длине шлицев AB = l = 0,01 м допустимое отклонение должно составлять по ГОСТ 1139-80  $BC = \delta = 0,05 \cdot 10^{-3}$  м, можно оценить допустимый угол закручивания:  $\gamma_{B} \approx 0,03^{\circ}$ .

С целью определения крутящего момента шлиценакатной головки (фильеры) необходимо рас-





Рис. 1. Накатывание шлиц

смотреть схему приложения действующих сил на один накатной ролик (рис. 3).

При устойчивом прямолинейном движении накатного ролика сумма моментов всех накатных ро-



Рис. 2. Угол закручивания шлицевого вала



$$\Sigma M_{o_1} = (F_2 - F_{\text{TP1}} + F_{\text{TP2}} + F_2^{I})h_1 + F_1^{I}h_2 , \qquad (4)$$

где  $F_{\rm rpl}, F_{\rm rp2}$  – силы трения металла о поверхность ролика, H;

$$F_2 = T_o^{\text{pon}} \cos \gamma_{\text{B}} F_1^{T} = T_o^{T \text{pon}} \sin \gamma_{\text{B}};$$
  
$$F_2^{T} = T_o^{T \text{pon}} \cos \gamma_{\text{B}},$$

 $T_{o}^{\text{рол}}$  – осевая сила противодействия накатного ролика, Н.

Для определения расстояний  $h_1$  и  $h_2$  необходимо рассмотреть пятно контакта при отклонении накатного ролика от прямолинейного положения (рис. 5). При этом площадь касания со стороны действия силы  $T_o^{\text{рол}}$  имеет форму дуги, расположенной симметрично оси накатного ролика (рис. 5, *a*), а со стороны  $T_o^{I \text{ рол}}$  – форму сектора, смещенного относительно оси накатного ролика (рис. 5, *б*).

Из расположения точки C приложения сил (рис. 5, 6) определим  $h_1$  и  $h_2$ :

$$h_1 = \frac{a}{2} + \frac{2}{3}r_i \, \text{tg } \theta;$$
 (5)



Рис. 3. Усилия на конической поверхности накатного ролика



Рис. 4. Нагружение накатного ролика действующими силами



Рис. 5. Площадь контакта и точка приложения активных сил *C*: a -со стороны действия силы  $T_{o}^{\text{рол}}$ :  $x_i = 1 / 3r_i; y_i = 0; \delta -$ со стороны действия силы  $T_o^{I \text{ рол}}$ :  $x_i = 1 / 3r_i; y_i = 1 / 3AB$ 

$$h_2 = \frac{1}{3}\sqrt{R^2 - (R - r_i)^2} , \qquad (6)$$

где *а* — ширина цилиндрической части накатного ролика, м;

*r<sub>i</sub>* – глубина внедрения ролика в заготовку, м;

 $\theta$  — угол наклона формирующего конуса накатного ролика, град;

*R* – радиус ролика, м.

Подставив уравнения (5) и (6) в уравнение (4) и преобразовав, получим:

$$\Sigma M_{o_{1}} = (T_{o}^{\text{pon}} \cos \gamma_{B} - F_{\text{Tp1}} + F_{\text{Tp2}} + T_{o}^{I \text{ pon}} \cos \gamma_{B}) \left(\frac{a}{2} + \frac{2}{3}r_{i} \, \text{tg}\theta\right) + T_{o}^{I \text{ pon}} \sin \gamma_{B} \frac{1}{3}\sqrt{R^{2} - (R - r_{i})^{2}}.$$
(7)

Суммарное усилие от одного ролика, закручивающее вал  $F_R$  (см. рис. 3), можно определить по выражениям

$$F_R = \frac{\Sigma M_{o_1}}{AB}, \qquad (8)$$

или

$$F_{R} = \frac{(T_{o}^{\text{pon}} \cos \gamma_{B} - F_{\text{rp1}} + F_{\text{rp2}} + T_{o}^{I \text{pon}} \cos \gamma_{B}) \left(\frac{a}{2} + \frac{2}{3} r_{i} \text{ tg } \theta\right)}{\sqrt{R^{2} - (R - r_{i})^{2}}} + \frac{1}{3} T_{o}^{I \text{pon}} \sin \gamma_{B}.$$
(9)

Усилие  $F_R$  вызывается перекосом накатного ролика и создает момент относительно центра заготовки точки O.

Крутящий момент всей фильеры будет складываться из моментов всех отклоняющихся накатных



Рис. 6. Расположение точки приложения сил на рабочем профиле ролика

роликов (перекос и боковое смещение) в шлиценакатной головке (см. рис. 2, 7):

$$\Sigma M_{\phi} = n \left( M_{o} + M_{p} \right), \qquad (10)$$

где *n* – число накатных роликов в фильере, шт.;

 $M_o$  — момент, создаваемый перекосом накатного ролика, Н·м;

 $M_{\rm p}$  — момент, создаваемый боковым смещением накатного ролика, Н·м.

Момент, создаваемый перекосом накатного ролика (см. рис. 2), можно определить по выражению

$$M_{\rho} = F_{R} r_{a} \cos \theta , \qquad (11)$$

где  $r_a$  – радиус вала по вершине зуба, м.

Момент, создаваемый боковым смещением накатного ролика, можно определить по выражениям (рис. 7):

$$M_{\rm p} = n T_i h; \tag{12}$$

$$h = (r_a - r_i + R) \operatorname{tg} \gamma_{p}, \qquad (13)$$

где  $T_i$  – нормальная реакция, H;

h — отклонение накатного ролика от центра вала, создаваемое углом  $\gamma_{p}$ , м;

γ<sub>p</sub> — угол, образованный отклонениями в сопряжениях шлиценакатной головки (ось — ролик — вставка — втулка), град.
 Нормальная реакция

$$T_i = T_o^{\text{pon}} \cos \psi , \qquad (14)$$

ψ – угол наклона клина, град.

Подставляя уравнения (9), (11)–(14) в уравнение (10), получим выражение для определения крутящего момента всей фильеры:



$$\Sigma M_{\phi} = n \times \left[ \left( \frac{(T_{o}^{\text{pon}} \cos \gamma_{B} - F_{\text{rp1}} + F_{\text{rp2}} + T_{o}^{I \text{pon}} \cos \gamma_{B}) \left(\frac{a}{2} + \frac{2}{3}r_{i} \text{ tg }\theta}{\sqrt{R^{2} - (R - r_{i})^{2}}} + \frac{1}{3}T_{o}^{I \text{pon}} \sin \gamma_{B} \right) r_{a} \cos \theta + n T_{o}^{\text{pon}} \cos \psi (r_{a} - r_{i} + R) \text{ tg } \gamma_{P} \right].$$

$$(15)$$

Рассмотрим силы трения в выражении (15). Наиболее полно описывает условия трения поверхностей без смазочной пленки пластически недеформированных тел молекулярно-механическая модель сухого трения И.В. Крагельского.

Согласно описанию этой модели сила прилипания — равнодействующая молекулярного и механического сцепления контактных поверхностей рассчитывается по фомуле

$$F_{\rm rp} = \xi A + \mu N, \tag{16}$$

µ — коэффициент, учитывающий скорость изменения касательных напряжений при изменении нормальных напряжений;

*N* – нормальная сила, Н.

Разделив выражение (16) на фактическую площадь контакта *A*, получаем:

$$\tau = \xi + \mu \, \sigma \,, \tag{17}$$

откуда  $F_{\tau p} = \tau A$ .

С учетом выражения (17) выражение (15) примет вид:

$$\Sigma M_{\phi} = n \times \left[ \left( \frac{(T_{o}^{\text{pon}} \cos \gamma_{B} - \tau_{xy1} A^{I} + \tau_{xy2} A + T_{o}^{I \text{pon}} \cos \gamma_{B}) \left(\frac{a}{2} + \frac{2}{3} r_{i} \text{ tg } \theta\right)}{\sqrt{R^{2} - (R - r_{i})^{2}}} + \frac{1}{3} T_{o}^{I \text{pon}} \sin \gamma_{B}} \right] r_{a} \cos \theta + n T_{o}^{\text{pon}} \cos \psi (r_{a} - r_{i} + R) \text{ tg } \gamma_{P}} \right],$$

$$(18)$$

где  $\xi$  – коэффициент молекулярного сцепления; A – фактическая площадь контакта, м<sup>2</sup>;



Рис. 7. Момент закручивания вала фильерой

где  $A^{I}$  – площадь пятна контакта со стороны действия силы  $T_{o}^{I \text{ рол}}$ , м<sup>2</sup> (см. рис. 4);

A — фактическая площадь пятна контакта (со стороны действия силы  $T_{o}^{\text{pon}}$ ), м<sup>2</sup>.

Выражение (18) позволяет оценить момент кручения шлиценакатной головки (фильеры), создаваемый отклонением накатных роликов от прямолинейного положения. Данный момент приводит в итоге к закручиванию шлицевой части вала.

Для того, чтобы отклонения шлицевого профиля укладывались в поле допуска по ГОСТ 1139–80, необходимо выполнения условия, когда момент, создаваемый фильерой, будет меньше или равен допускаемому моменту кручения вала

$$M_{\phi} \leq [M_{\kappa}].$$

Одним из путей снижения момента закручивания роликовой фильеры является снижение контактных сил трения деформируемого металла о на-



#### Рис. 8. Диаграмма параллельности шлиц при твердости вала НВ 190...207:

a – без покрытия;  $\delta$  – с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN; 1-16 – порядковый номер шлица; поле допуска отклонений по прямолинейности 0...0,04 мм, по толщине 3,5<sup>-0,03</sup><sub>-0,078</sub> ГОСТ 1139–80. Отклонения от параллельности показаны на расстоянии от торца заготовки:

— 10 мм;
— 15 мм;
— 30 мм;
— 50 мм;
— 70 мм

катной ролик. Снизить силы трения можно различными путями.

Одним из таких путей является нанесение на рабочий профиль шлиценакатных роликов пленочных износостойких покрытий с низким коэффи-



Рис. 9. Диаграмма толщины шлиц при твердости вала НВ 156...172:

*a* – без покрытия; *б* – с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN. Толщина шлиц показана на расстоянии от торца заготовки:

— — 10 мм;

- — 40 мм;
- ---- 70 мм

циентом трения. По результатам лабораторных испытаний [6], проведенных на машине трения 2070 CMT-1, для исследований были выбраны покрытия TiZrN с коэффициентом трения f = 0,02 (коэффициент трения накатных роликов без покрытия равен f = 0,16). Данные покрытия наносили на образцы ионно-плазменным напылением на установке типа "Булат-6", оснащенной системой магнитной фокусировки плазменного потока. Ролики



устанавливали в оправку [7], что обеспечивало равномерный прогрев инструмента.

По результатам опытно-промышленной проверки было оценено влияние однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN с низким коэффициентом трения на параллельность шлицевого профиля относительно оси центров заготовки и толщины шлиц (зубьев). После замеров шлицевых валов были построены диаграммы параллельности шлиц (рис. 8) и диаграммы толщины шлиц (зубьев) (рис. 9).

Сравнивая полученные диаграммы шлицевого профиля, полученного накатными роликами с покрытием и без покрытия (см. рис. 8), можно сделать вывод, что выход показаний параллельности шлиц за пределы поля допуска у шлицевого профиля без применения покрытий выше, чем у шлицевого профиля с применением накатных роликов с покрытиями на 20...25 %. Сравнивая диаграммы по толщине шлиц (рис. 9, *a*) видно, что толщина шлиц, накатанных роликами без покрытий, находится ниже поля допуска на 50...55 %. Это связано с отклонениями накатного ролика во время деформирования от прямолинейного состояния.

При накатывании шлицевого профиля роликами с покрытием TiZrN толщина шлиц находится в поле допуска (рис. 9,  $\delta$ ). Это связано со снижением трения в зоне контакта накатного ролика с материалом заготовки за счет нанесения однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN с низким коэффициентом трения и соответственно уменьшения крутящего момента фильеры  $M_{\phi}$ .

#### Выводы

1. Момент, создаваемый роликовой фильерой, должен быть меньше или равен допускаемому моменту на валу:  $M_{\phi} \leq [M_{\kappa}]$ . Одним из путей снижения момента закручивания роликовой фильеры является снижение контактных сил трения деформируемого металла о накатной ролик путем нанесения на рабочий профиль шлиценакатных роликов износостойких покрытий с низким коэффициентом трения. 2. Наносимое однослойное многокомпонентное покрытие TiZrN с низким коэффициентом трения повышает точность шлицевого профиля на валах, что ведет к повышению качества шлицевых валов.

3. Для уменьшения влияния погрешностей заготовки на геометрическую точность шлицевых профилей на валах следует применить сферический упор в конструкции шлиценакатного стана [5]. Данный сферический упор позволяет компенсировать неточности изготовления заготовки путем самоустановки ее под действием шлиценакатных роликов в начальный момент касания.

#### Библиографический список

1. Востров В.Н. Современные технологии накатывания периодических профилей внутреннего зацепления // Металлообработка. 2011. № 3. С. 36–42.

2. Востров В.Н., Сухих И.В., Молодкин Ю.В. Устройства для моделирования процессов накатывания зубьев // Металлообработка. 2006. № 5-6. С. 71-74.

3. Упрочнение прямобочных шлицев на валах при многопроходном холодном пластическом деформировании накатной головкой / Г.Д. Федотов и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 7. С. 18–20.

4. Федотов Г.Д., Табаков В.П., Адакин В.А. Геометрическая точность прямобочных шлицев на валах при многопроходном холодном пластическом деформировании накатной головкой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 4. С. 3–7.

5. Пат. № 2468879 РФ. Устройство для повышения точности шлицевых профилей на валах при холодном пластическом деформировании / Г.Д. Федотов, В.А. Адакин, М.М. Бадыков; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО "Ульяновская ГСХА"; заявл. 04.05.2011; опубл. 10.12.2012. Бюл. № 34.

6. Адакин В.А. Повышение долговечности деформирующего инструмента применением износостойких покрытий // Вестник УлГТУ. Ульяновск: ГТУ, 2012. № 4. С. 32–36.

7. Пат. № 109608 РФ. Оправка для закрепления деформирующего инструмента (ролика) при нанесении покрытий / В.А. Адакин, Ф.Г. Федотов; заявитель и патентообладатель В.А. Адакин; заявл. 04.04.2011; опубл. 20.10.2011. Бюл. № 29.





УДК 62-755; 621.317.4

**Р.М. Гоцеридзе,** канд. техн. наук, **С.В. Румянцев** (МГТУ им. Н.Э. Баумана) *E-mail: ruslan.gotseridse@gmail.ru* 

### Пути повышения точности при фазовом методе измерения параметров статической неуравновешенности изделий

Рассмотрены технические возможности и ограничения фазового метода измерения параметров неуравновешенности при помощи магниторезонансного подвеса. Описаны составляющие погрешности фазометра и пути повышения точности фазового метода измерения. Предложена конструкция фазоизмерительного блока с расширенными возможностями измерения фазового сдвига.

The technical possibilities and restrictions of the phase method measurement unbalance parameters with the help of magnetic-resonance suspension are considered. It is described forming inaccuracy of the phase-meter and way of increasing to accuracy of the phase method measurement. The offered construction phase-measurement block with extended possibility of the phase shift measurement.

Ключевые слова: магниторезонансный подвес, поплавковый чувствительный элемент, измерение, балансировка, фазовый сдвиг, преобразователь фаза—время, времяимпульсное преобразование.

**Keywords:** Magnetic-resonance suspension, floating detector element, measurement, balancing, phase shift, phase-time converter, time-pulsed transformation.

В технике и технологии гироскопов и акселерометров большое распространение получили бесконтактные электромагнитные опоры переменного тока, называемые магниторезонансным подвесом (МРП). В готовых приборах МРП используют как магнитный подшипник без сухого трения, удерживающий чувствительный элемент в центральном положении, обеспечивая максимальную чувствительность и точность измерения требуемых величин (скоростей и ускорений).

В технологическом процессе производства гироскопов и акселерометров МРП используют для статической балансировки поплавковых чувствительных элементов (ПЧЭ) гироскопических приборов благодаря тому, что МРП обладает свойствами высокоточного датчика сил и линейных перемещений, что позволяет измерять параметры неуравновешенности ПЧЭ и затем корректировать эту неуравновешенность. Информация о значениях неуравновешенности получается при измерении параметров электрических цепей МРП (напряжения, тока, мощности, магнитного потока, фазы и т.д.) и может быть получена различными путями. В работе [1] были рассмотрены вопросы перспективности фазового метода измерения сил и перемещений ротора МРП, связанного с балансируемым изделием. Были рассмотрены идея и принцип фазового метода, а также его математическая модель. Также были рассмотрены основные узлы измерительного блока балансировочной установки, выполненного на основе времяимпульсного преобразования разности фаз входного сигнала с последующим заполнением временного фазового интервала счетными импульсами.

Число счетных импульсов за цикл измерения подсчитывают цифровые счетчики. Счетчики формируют двоичный цифровой код, пропорциональный углу фазового сдвига. Таким образом происходит аналогово-цифровое преобразование сигнала сдвига фазы в биты и байты, которые можно вводить в персональный компьютер (через стандартный интерфейсный адаптер) для дальнейшей обработки и индикации.

В данной статье приведена дальнейшая разработка фазового метода в плане повышения точности и чувствительности измерения параметров неуравновешенности ПЧЭ.

Схема работы МРП, поясняющая принцип измерительного метода, представлена на рис. 1. Балансировочная установка содержит два одинаковых МРП, центрирующие ПЧЭ через роторы, установленные на его цапфах. Статоры МРП закреплены неподвижно, они являются частью балансировочной установки. Роторы (правый и левый) связаны с ПЧЭ и являются его частями.

Обмотки вертикальных полюсов статоров каждого МРП образуют один канал измерения фазового сдвига, вызванного силами неуравновешенности, действующие на один ротор ПЧЭ. Установка имеет два МРП и, соответственно, два канала измерения, которые дают возможность определить общую картину статической неуравновешенности ПЧЭ.

Каждый из роторов 2 ПЧЭ расположен между двумя вертикальными полюсами 1 и 3 статора (боковые полюса на рис. 1 не показаны). На полюсах расположены обмотки с индуктивностями  $L_1$  и  $L_3$ , создающие центрирующую силу для ротора МРП. С этих же обмоток снимают напряжения  $U_1$  и  $U_3$ , фаза которых подлежит измерению.

Можно измерять как разность фаз токов, так и напряжений, поскольку в индуктивной катушке фазы токов и напряжений всегда смещены на угол 90°. Как правило, целесообразно измерять напряжения, так как их легче преобразовать в измеряемую величину. Зависимости для фазы токов и напряжений в обмотках от их индуктивностей даны в работе [2] и имеют вид:

$$\varphi_1 = \arctan \frac{\omega L_p}{r} \left( \frac{L_1}{L_p} - 1 \right);$$
$$\varphi_3 = \arctan \frac{\omega L_p}{r} \left( \frac{L_3}{L_p} - 1 \right),$$



Рис. 1. Схема работы МРП и его фазовая характеристика: 1 и 3 — вертикальные полюса статора МРП; 2 — ротор МРП;  $L_1 \text{ и } L_3$  — индуктивности обмоток полюсов 1 и 3; C конденсатор;  $U_1 \text{ и } U_3$  — измеряемые напряжения на обмотках  $L_1 \text{ и } L_3$ ;  $U_{\text{ген}}$  — напряжение, подводимое от генератора стабильной частоты;  $\delta_{\text{ц}}$  — магнитный зазор при центральном положении ротора 2;  $\delta_{\text{р}}$  — магнитный зазор при резонансе напряжений;  $\varphi_1 = f(\delta_1) \text{ и } \varphi_3 = f(\delta_3)$  — фазовые характеристики полюсов 1 и 3

где  $\omega$  – угловая частота питающего напряжения, рад./с;

*L*<sub>p</sub> – индуктивность статора при резонансе напряжений. Выражения для индуктивностей имеют вид:

$$L_{1} = \frac{\mu_{0} S w^{2}}{\delta_{1}};$$
$$L_{3} = \frac{\mu_{0} S w^{2}}{\delta_{3}};$$
$$L_{p} = \frac{\mu_{0} S w^{2}}{\delta_{p}},$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная для вакуума,  $\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6}$ , Г/м;

*S* – площадь поперечного сечения магнитного зазора между полюсом и ротором, м<sup>2</sup>;

w – число витков обмотки;

 $\delta_1$  и  $\delta_3-$  длины магнитных зазоров, м;

 $\delta_{\rm p}$  — длина магнитного зазора при резонансе напряжений, м.

Качественные графики зависимостей фазы  $\varphi$  напряжений от значения магнитного зазора  $\delta$  для каждого из полюсов также показаны на рис. 1:  $\varphi_1 = f(\delta_1)$  и  $\varphi_3 = f(\delta_3)$ .

Из графиков видно, что при центральном положении ротора 2, когда магнитные зазоры обоих полюсов одинаковы и равны  $\delta_1 = \delta_3 = \delta_{\mu}$ , фазовые сдвиги  $\varphi_1$  и  $\varphi_3$  равны по значению и направлению, что соответствует точкам  $B_1$  и  $B_3$  на графиках. Следовательно, разность этих фазовых углов равна нулю.

Рабочий диапазон изменения фазы для магнитного зазора каждого полюса лежит в промежутке  $\delta_p < \delta_l < 0$  и  $\delta_p < \delta_3 < 0$ , что соответствует участкам кривых  $A_1 B_1 C_1$  и  $A_3 B_3 C_3$ . Эти участки достаточно линейные, что дает хорошие практические результаты.

При очевидной простоте метода существуют определенные нюансы в построении измерительной схемы для того, чтобы получить высокие показатели точности и чувствительности измерений.

Как отмечалось в работе [1], главной частью фазоизмерительной схемы является преобразователь фаза—время (ПФВ). Наиболее простым решением измерительного устройства является однополупериодный триггерный преобразователь, соединенный со схемой совпадения и генератором квантующих импульсов, подробно рассмотренные в работе [1]. Следует рассмотреть возможные погрешности фазоизмерительной схемы (фазометра), которые могут снизить точность измерения угла фазового сдвига.

Основными составляющими погрешностями фазометра являются инструментальная погрешность и погрешность квантования.

**Инструментальная погрешность** определяется нестабильностью времени срабатывания триггера ПФВ, различными уровнями срабатывания схем формирователей и др. То есть, инструментальная погрешность связана с электронными параметрами схемы.

**Погрешность квантования** обусловлена тем, что интервал времени  $t_{\varphi}$  можно измерять с погрешностью не более одного периода квантующих импульсов. Кроме того, погрешность квантования зависит от дробной части отношения частоты сигнала и частоты квантования.

Максимальная погрешность от квантования будет равна:

$$\delta_0 = \frac{1}{N_{\text{HOM}}} \ \phi_{\text{HOM}} = \phi_{\text{HOM}} \frac{T_0}{T} \ ,$$

где  $N_{\text{ном}}$  — число импульсов, подсчитанное счетчиком; T и  $T_0$  — период входного сигнала и период квантующих импульсов;

 $\phi_{\text{ном}}$  – номинальное значение угла фазового сдвига.

Если погрешность от квантования распределена по закону Симпсона, то среднеквадратическое отклонение погрешности

$$\sigma_0 = \delta_0 / \sqrt{6} \, .$$

Снизить рассмотренные два типа погрешности и расширить диапазон измерений можно при использовании ряда несложных схемотехнических решений.



Рис. 2. Структурная схема измерительного блока

Так как однополупериодному ПФВ в значительной мере свойственны погрешности за счет ухода нулевой линии в формирующих устройствах из-за температурного и временного дрейфа показаний (что в целом присуще всем аналогово-цифровым преобразователям), то можно взамен применить схему с двухполупериодным преобразованием. Такая схема использует информацию об обоих переходах измеряемого синусоидального сигнала через нулевой уровень.

При наличии уходов нулевой линии импульсы с выходов управляемых триггеров будут иметь различные длительности, однако их среднее значение  $t_{\varphi} = (t_{\varphi 1} + t_{\varphi 2}) / 2$  остается постоянным и пропорциональным преобразуемому фазовому сдвигу.

Проблема нестабильности времени срабатывания триггеров может быть исключена применением так называемых схем с перекрытием (цифровых логических элементов "И"), имеющих большее быстродействие и лучшую помехоустойчивость. Более того, схемы на логических элементах выгодно отличаются с точки зрения простоты и цены.

Существенно снизить инструментальную погрешность и погрешность квантования можно также при использовании метода усреднения, т.е. при усреднении результатов измерений за промежуток времени, достаточно большой по сравнению с периодом исследуемых колебаний. При этом легко обеспечить отсчет результата измерения в единицах фазы или любом другом виде (с требуемой точностью и разрядностью), удобном для компьютерной обработки.

Кроме того, для исключения неоднозначности отсчета необходимо иметь возможность определения знака разности фазового угла, который отражает направление смещения ротора чувствительного элемента под действием возмущающих сил.

Все эти перечисленные методы повышения точности фазового метода нашли отражение в следующей структурной схеме измерительного блока балансировочного устройства (рис. 2), объединяющей преимущества двухполупериодного преобразования, метода перекрытия сигналов, метода усреднения и схемы определения знака разности фаз.

Диаграмма рабочих сигналов фазоизмерительного блока изображена на рис. 3.

При работе схемы с выходов формирующих устройств – усилителей-ограничителей *A*1 и *A*2, имеющих как прямые, так и инверсные выходы, прямоугольные импульсы с фрон-







тами, привязанными к нулевым переходам входных сигналов, поступают на входы схем совпадения.

На выходе схемы совпадения *D*1 вырабатываются импульсы, соответствующие времени перекрытия импульсов с прямого и инверсного выходов формирующих устройств *A*1 и *A*2 первого и второго каналов соответственно, и равные интервалам времени между положительными переходами нулей входных сигналов.

Схема совпадения D2 формирует импульсы, соответствующие интервалу времени между отрицательными нуль-переходами входных сигналов. Просуммировав импульсы с выходов схем совпадения на схеме ИЛИ, получим двухполупериодное преобразование "сдвиг фазы – временной интервал" в виде сигнала  $u_3$ , представляющего собой прямоугольные импульсы длительностью  $t_{\varphi}$ , пропорциональной углу фазового сдвига:

$$t_{\varphi} = \varphi \, \frac{T}{360} \,, \tag{1}$$

где T — период входного сигнала, причем за один период входного сигнала формируется два импульса  $t_{\phi}$ .

Для исключения неоднозначности отсчета используют схему индикации знака разности фаз. Эта схема содержит два формирователя коротких импульсов привязки, выполненных на дифференцирующих *RC*-цепочках (*R*1*C*1 и *R*2*C*2), две схемы совпадения *D*4 и *D*5, и *RS*-триггер знака *D*6.

Диаграмма работы схемы индикации знака изображена на рис. 4. Если  $\varphi_1 > \varphi_2$ , то импульс привязки  $u_9$  проходит через схему совпадения *D*4 (поскольку на втором ее входе присутствует сигнал  $u_{10}$ ) и устанавливает триггер *D*6 в единичное состояние. На выходе триггера появляется сигнал  $u_{12}$ . Если  $\varphi_1 < \varphi_2$ , то в этом случае импульс привязки  $u_{11}$  бу-



Рис. 4. Диаграмма сигналов для схемы определения знака фазового сдвига дет проходить через схему совпадения *D*5 и триггер *D*6 установится в нулевое состояние.

Знак измеряемой разности фаз, таким образом, определяется по состоянию триггера знака и сигналу  $u_{12}$ . При положительном сдвиге фазы выход триггера формирует сигнал *SIGN* логической единицы (высокий уровень сигнала), при отрицательном сдвиге уровень сигнала *SIGN* – логический ноль (низкий уровень).

На схему совпадения *D*7 поступают сигнал  $u_3$  с выхода *D*3 преобразователя фаза—время и сигнал  $u_4$  от генератора *D*8 квантующих (счетных) импульсов. Генератор квантующих импульсов имеет кварцевую и температурную стабилизацию частоты, что уменьшает погрешность квантования промежутка времени  $t_{\varphi}$ .

На выходе схемы совпадения D7 получаем импульсы, число N которых пропорционально  $t_{\varphi}$ , т.е. углу фазового сдвига:

$$N=2t_{\varphi}\ /\ T_{0}\,,$$

где  $T_0$  — период квантующих импульсов, а множитель 2 означает удвоение импульсов  $t_{\varphi}$  при двухполупериодном преобразовании. Тогда с учетом формулы (1) получим:

$$N = 2 \varphi \, \frac{T}{T_0} \, \frac{1}{360}.$$
 (2)

Полученные пачки импульсов  $u_5$  подаются на один из входов схемы совпадения D10, на второй вход которой поступают импульсы  $u_6$ , сформированные путем деления частоты генератора при помощи схемы делителя D9, представляющей собой каскадное соединение счетчиков для получения нужного коэффициента деления. Длительность импульса, сформированного делителем D9, определяет время цикла измерения  $T_{\mu}$ :

$$T_{\rm II} = k_{\rm дел} T_0 ,$$

где k<sub>дел</sub> – коэффициент деления делителя частоты;

 $T_0$  — период квантующих импульсов, формируемых генератором *D*8.

Общее число подсчитанных импульсов за интервал времени  $T_{\rm u}$ 

$$N_{\rm II} = n \ N, \tag{3}$$

где n — число групп импульсов,  $n = 2T_{II} / T$ ;

N-число квантующих импульсов, укладываемых в промежутке  $t_{\rm o}$  .

Тогда в соответствии с формулой (3)

$$N_{\rm II} = 2 \ k_{\rm den} \ \frac{T_0}{T} \ N$$



Подставив значение N из формулы (2) в последнее выражение, получим:

$$N_{\rm II} = 2 \; \frac{k_{\rm den} T_0}{T} \; 2 \; \varphi \; \frac{T}{T_0} \; \frac{1}{360} = \varphi \frac{k_{\rm den}}{90}$$

Следовательно, при  $k_{\text{дел}} = 9 \cdot 10^n$  отсчет получается в градусах и показания не зависят от частоты квантующего генератора, а при большом числе групп импульсов *n* показания не зависят и от частоты входных напряжений, т.е. налицо расширение диапазона измерений фазового сдвига. Нижний диапазон определяется временем цикла измерения  $T_{\text{ц}}$ , а верхний диапазон определяется частотой и погрешностью квантования.

Сравнивая схему измерения фазового сдвига за один период входного сигнала и схему измерения "среднего" значения фазового сдвига, при равных погрешностях квантования, последние имеют в  $\sqrt{n}$  более высокую точность. Относительная погрешность измерения составляет порядка 0,1 %.

На выходе *D*10 получается импульсный сигнал  $u_7$ , представляющий собой *n* пачек импульсов с частотой квантующего генератора, подаваемых на счетчик *D*11, который осуществляет подсчет числа квантующих импульсов, пропорционального углу фазового сдвига, за один период измерения  $T_{\mu}$ .

Счетчик импульсов образован каскадным соединением нескольких микросхем счетчиков по модулю 16, формирующим на выходе двоичный цифровой код. Число микросхем счетчиков выбирают из условий, необходимых точности и разрядности получаемой в конце счета значения фазового сдвига.

Для стандартного исполнения будет достаточно 16 двоичных разрядов (*DD*0–*DD*15), т.е. потребуется четыре четырехразрядных счетчика.

Двоичные выходы счетчиков подключают к интерфейсу персонального компьютера через специальную плату сопряжения, содержащую порты ввода-вывода. Возможно также подключение через стандартный параллельный порт принтера.

Кроме выходов данных *DD*0–*DD*15, на интерфейс компьютера подаются еще два цифровых сигнала – сигнал SIGN, несущий информацию о знаке (направлении) фазового сдвига и сигнал *READY*, отражающий готовность ввода подсчитанного счетчиком *D*11 числа импульсов, пропорциональных углу фазового сдвига.

Сигнал *RESET*, подаваемый на выводы сброса счетчиков и делителей, формируется программой измерения персонального компьютера и служит для запуска очередного цикла измерения.

#### Выводы

1. Рассмотрена теоретическая схема работы фазового метода и показаны аналитические зависимости, отражающие закон изменения фазы напряжений и токов в магниторезонансном подвесе. Выявлены рабочие участки на фазовой характеристике для работы МРП при измерении угла фазового сдвига.

2. Рассмотрена природа погрешностей измерения, присущих методу преобразования "фаза—время", и предложены пути решения вопросов повышения точности при измерении разности фаз с помощью МРП.

3. Предложена структурная схема фазоизмерительного блока, отражающего ряд технических решений для повышения точности и расширения измерительных возможностей МРП при балансировке.

#### Библиографический список

1. Гоцеридзе Р.М., Румянцев С.В. Определение параметров неуравновешенности поплавкового чувствительного элемента с магниторезонансным подвесом методом измерения угла фазового сдвига // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2013. № 1, 2. С. 17–21.

2. Гоцеридзе Р.М. Разработка и исследование универсальной установки с резонансными электромагнитными ньютонометрами (РЭМН) для определения параметров неуравновешенности поплавковых чувствительных элементов (ПЧЭ). Дис. ... канд. техн. наук., М., 1974.

3. **Кузнецов В.А., Долгов В.А.** Измерения в электронике: справочник. М.: ЁЁ Медиа, 2012. 512 с.

00000000000

## В ПОМОЩЬ КОНСТРУКТОРУ, ТЕХНОЛОГУ

УДК 621.833

А.Н. Виноградов, С.И. Липатов, Р.Б. Марголит, канд. техн. наук (Рязанский институт (филиал) Московского государственного машиностроительного университета) E-mail: r.margolit@yandex.ru

# Проблемы сборки редукторов с арочными зубчатыми передачами

Показано, что арочные зубчатые передачи являются развитием и совершенствованием традиционных прямозубых, косозубых и шевронных эвольвентных передач и обладают перед ними рядом преимуществ в отношении нагрузочной способности, долговечности и плавности работы. Выявлены особенности сборки арочных передач и изложены пути решения возникающих проблем.

It is shown that arc tooth gearings are development and improvement of traditional spur, helical and herringbone involute gearings and in comparison with well-known gearings provide a number of advantages – high load capability, durability and smooth operating. Features of arc tooth gearings assemblies are revealed and ways to solve problems are set out.

Ключевые слова: зубчатая передача, сборка редуктора.

Keywords: tooth gearing, assembly of reducer.

**В** Рязанском институте (филиале) МГМУ разработана технология изготовления арочных колес 5–6-х степеней точности (ГОСТ 1643–81). По эксплуатационным показателям арочные зацепления (рис. 1 на стр. 3 обл.) превосходят прямозубые, косозубые, шевронные цилиндрические передачи наружного зацепления, а по себестоимости изготовления соизмеримы с ними.

Внешне арочные колеса напоминают шевронные, но зубья расположены не по прямым линиям, а по радиусу, образуя арку. Каждый зуб имеет две стороны: выпуклую и вогнутую. Арочные колеса обеспечивают высокую нагрузочную способность, долговечность, плавность и малошумность работы. Эти колеса имеют ряд отличительных особенностей:

• эвольвентный зуб колеса имеет по длине зуба во всех сечениях, перпендикулярных оси колеса, одинаковый угол профиля; • радиус у выпуклой и вогнутой сторон зуба одинаков;

• толщина зубьев в центральном, торцовом или промежуточном сечениях, перпендикулярных оси колеса, одинакова.

Арочное колесо — это улучшенный вариант шевронного, без разделительной канавки по центру зубьев для выхода режущего инструмента. Это подтверждается накопленным опытом успешного использования арочных передач в редукторах различного назначения. На рис. 2 (на стр. 3 обл.) показаны колеса редуктора листоупаковочной машины на металлургическом заводе "Северсталь" после двух лет эксплуатации в тяжелом реверсивном трехсменном режиме.

Двухлетняя эксплуатация на рязанском заводе "Тяжпрессмаш" также не позволила обнаружить следы износа на зубьях пяти колес агрегатной головки сверлильного станка.

Авторами разработаны способы [1–3] зубонарезания арочных колес на фрезерных, расточных четырехкоординатных станках с ЧПУ и токарных обрабатывающих центрах. Закаленные зубья подвергают финишному зубофрезерованию, которое по производительности превосходит зубошлифование, а по точности ему не уступает. В ООО НПО "Зубчатые трансмиссии" освоено изготовление колес различных размеров: модулем 3...9 мм, числом зубьев 11–93 и диаметром 40...800 мм [4].

Тем не менее, при использовании арочных передач в редукторах возникает ряд особенностей:

1) зубчатое колесо с одним расположением арки может зацепляться только с колесом, имеющим у арки противоположное расположение;

2) как и шевронная, арочная передача не может быть собрана при осевом смещении одного колеса относительно другого;

3) высокие показатели несущей способности проявят себя в полной мере только при совмеще-

нии в одну плоскость центральных сечений зубчатых венцов. Такое осевое расположение одного колеса относительно другого образно можно назвать "сборка арки в арку".

Эти пункты целиком относят к проблемам сборки передач, а первый случай также учитывают при изготовлении арочных колес. При перевороте оси колеса на 180° расположение арки изменяется на противоположное. Но не каждое колесо конструктивно оформлено как абсолютно симметричное, что лишает его возможности переворота при сборке.

Чтобы различать колеса при проектировании и правильно изготавливать, необходимо договориться, как обозначать расположение зубьев арочных колес. Предлагается выбор из трех сочетаний:

- 1) прямое обратное;
- 2) правое левое;
- 3) выпуклое вогнутое.

Одно из колес пары будем считать прямого (правого, выпуклого) исполнения, а другое – обратного (левого, вогнутого). Предлагаем два способа распознания расположения арки.

Например, прямым выпуклым расположением арки считать колесо, размещенное перед глазами, у которого при горизонтальном расположении оси вблизи видна выпуклая сторона зуба, а вогнутая сторона находится на его противоположной стороне. На рис. 1 левое большее колесо имеет прямое (правое, выпуклое), а меньшее – противоположное расположение арки зубьев.

Или иной способ распознания направления зуба. Рассматривая сверху колесо, обращенное торцом к наблюдателю, считать прямым то, у которого выпуклые стороны зубьев обращены к ладони правой руки, а вогнутые стороны — к ладони левой руки. В чертеже колеса расположение арки необходимо отображать выпуклой или вогнутой дугой по всей ширине зуба, отслеживая противоположную направленность арки у колес одной передачи.

Предпосылки к возникновению путаницы при нарезании исчезнут, если при конструировании арочных передач одно из колес пары делать полностью симметричным относительно центрального сечения венца. Это создаст возможность нарезать оба колеса пары произвольно, а затем при сборке передачи, используя переворот, располагать симметричное колесо с нужным расположением арки.

Можно задаться вопросом о выборе расположения арки ведущего колеса. Авторам представляет-

ся, что если различие имеется, то оно с точки зрения работоспособности передачи столь незначительно, что с учетом работы многих редукторов в реверсивном режиме не заслуживает внимания.

Сборка без осевого смещения одного колеса относительно другого не вызывает затруднений, если непосредственно при монтаже имеется возможность вводить валы в отверстия колес, размещенных внутри корпуса. В этом случае нет отличия от сборки других видов цилиндрических колес. Одно из колес устанавливают в корпус вместе с валом и подшипниками окончательно. Парное колесо сцепляют с ним радиальным сближением, и только после этого вводят вал в отверстие.

Никаких проблем с вводом в зацепление не будет, если корпус редуктора имеет разъем по осям валов, и валы с колесами и подшипниками укладываются радиальным перемещением.

Наибольшие проблемы возникают при обеспечении установки венцов "арка в арку". На рис. 3 (на стр. 3 обл.) показан результат обкатки на испытательном стенде передачи из двух колес модуля 4 мм с 18 и 32 зубьями. При точном осевом расположении одного колеса относительно другого пятно контакта по ширине и высоте зуба приближено к 90 %. После 280 ч обкатки улучшенных до твердости НВ 260 колес никаких следов износа зубьев не обнаружено.

Аналогичные испытания арочных колес выполнили в редукторе, но одно колесо передачи сместили относительно другого в осевом направлении на предельную величину, которую позволил зазор в передаче. Через 240 ч были зафиксированы чрезмерный износ одной половины зубьев (рис. 4 на стр. 3 обл.) и металлическая пыль в масле редуктора. После замены зубчатой передачи и сборки "арка в арку" испытания повторили. Никаких следов износа не обнаружено.

Описанные испытания наглядно показывают важность выполнения правильной сборки. Ясно, что любое отступление от совмещения центральных сечений колес приведет к резкому уменьшению пятна контакта и несущей способности передачи. Начнет работать только одна половина венцов.

Следовательно, необходимо решение основной проблемы, возникающей при сборке редукторов с арочными передачами — обеспечение правильного взаимного осевого расположения венцов. Эту проблему нужно начинать решать при проектировании



редукторов. Один из валов жестко закрепить в опорах, создав возможность осевого смещения парного колеса одним из трех способов:

 перемещением вала с колесом в опорах, предоставляющих валу свободу осевого смещения в подшипниках, например, при использовании радиальных подшипников с цилиндрическими роликами;

2) перемещением вала с колесом возможностью сдвига в расточках корпуса наружных колец радиальных и радиально-упорных подшипников многих видов;

3) смещением колеса в осевом направлении по шпоночному или шлицевому валу.

Один из валов и колесо, сидящее на нем, можно лишать возможности осевого сдвига. Чаще всего таким валом является выходной вал редуктора, соединяющийся с другими механизмами машины. Осевая свобода либо не допустима, либо создаст излишние трудности для работы. Реже, но достаточно часто, ограничена свобода осевого смещения у входного вала редуктора. Промежуточные валы редуктора такой свободой обладают.

Таким образом, имеем следующие варианты конструкции опор валов:

• вал с зубчатым колесом жестко закреплен в осевом направлении (в опорах использованы радиально-упорные подшипники или набор из радиальных и упорных шариковых или роликовых подшипников);

• вал с зубчатым колесом имеет незначительную свободу осевого смещения (в опорах использованы радиальные подшипники);

• вал с колесом имеет возможность при сборке смещаться в опорах в осевом направлении, после чего требует жесткой фиксации (наружные кольца подшипников имеют возможность смещаться в осевом направлении, после чего фиксируются);

• вал с колесом имеет возможность при сборке смещаться в опорах в осевом направлении (удерживается в требуемом положении аркой колеса смежного вала).

Сборку "арка в арку" можно реализовать двумя способами:

• использованием самоцентрирования, самоустановки колес с фиксацией или без нее осевого положения одного из колес;

• смещением одного из колес относительно другого по замерам с последующей фиксацией осевого положения смещаемого колеса.

Явление самоцентрирования колес было изучено на стенде (см. рис. 3). Ведущее и ведомое колеса сидят на валах по посадке h6/H6 с зазором около 0,02 мм. Поочередно ведущее, а затем ведомое колесо закрепляли жестко на валу, а смежное колесо сдвигали влево и вправо до предела, допущенного радиальным зазором в зацеплении. Каждый раз при вращении свободное колесо возвращалось в среднее положение, самоустанавливалось строго "арка в арку". При необходимости это положение можно зафиксировать стопорами.

Если зубчатый венец колеса будет сравнительно узким по сравнению с радиусом арки, то возможно проявление самоторможения, которое воспрепятствует самоцентрированию. Рассмотрим рис. 5, на котором радиус арки обозначен как R, а ширина венца – B. Действует трение между зубьями колес и в посадке колеса на валу или в подшипниках, в том месте, где происходит смещение колеса. Приняв значение коэффициента трения, равным 0,15, найдем значение угла  $\alpha$ , при котором возможно самоторможение: tg  $\alpha = 0,15$ ,  $\alpha = 8,5^\circ$ ,  $B = 2R \sin \alpha$ .

Минимальная ширина венца B, меньше которой возможно самоторможение при различных радиусах R арки, имеет следующие значения, мм:

<i>R</i>	30	40	50	60	70	80	90
<i>B</i>	8,88	11,84	14,80	17,76	20,72	23,68	26,64

Расчеты показывают, что даже при сравнительно малой ширине венца самоустановка колес будет происходить. Опасность возникнет только при ширине венца в 3,4 раза меньшей радиуса арки.

Это не означает, что не следует применять арочные колеса малой ширины. Действительно, исчезает такое положительное качество арочных передач, как увеличение коэффициента перекрытия. Тем не менее, узкие арочные колеса могут конкурировать с аналогичными прямозубыми колесами. Разработанный в Рязанском институте (филиале) МГМУ способ позволяет изготавливать арочные колеса

Рис. 5. Арка зуба колеса малой ширины



![](_page_32_Figure_1.jpeg)

Рис. 6. Конструкция, позволяющая смещать и фиксировать положение колеса

высокой точности с соизмеримой производительностью и себестоимостью.

Другой способ установки "арка в арку" реализуется отысканием этого положения. Установив индикатор на торец колеса, нужно поочередно смещать колесо или вал с колесом до упора в зубья парного колеса вначале в одну, а затем в другую сторону. Среднее положение будет соответствовать положению "арка в арку". Это положение можно зафиксировать, если это предусмотрено конструкцией (рис. 6).

В момент отыскания положения "арка в арку" наружным кольцам подшипников *6* и *8* придают свободу осевого перемещения. Перемещают в гильзах вал-шестерню с подшипниками влево—вправо до упора в зубья смежного колеса и с помощью индикатора находят среднее положение колеса.

При дальнейших регулировочных работах следят за тем, чтобы это положение сохранилось. Притягивают винтами 4 левую крышку 3, винтом 1 перемещают диск 5 до касания наружного кольца 6 левого подшипника.

Положение правого подшипника регулируют с помощью резьбовых втулок 9, поворот которых изменяет положение гильзы 12 и правой крышки 11. Доступ к втулкам 9 осуществляют через зазор между торцами гильзы 12 и корпуса редуктора. На левом конце втулки 9 имеется шестигранник, дающий возможность плоским ключом поворачивать втулки. По завершении регулировки производят затяжку винтов 10 и контргайки 2.

На рис. 7 (на стр. 3 обл.) показано устройство редуктора нефтяного станка-качалки, в котором колеса Новикова заменены арочными. Изготовление колес такого редуктора представляет определенную сложность. Четыре колеса левой ветви должны быть абсолютно одинаковыми с аналогичными парными колесами правой ветви. Необходимо обеспечить беззазорность зубчатых эвольвентных передач. Для арочных колес сложности преодолимы нарезанием парных колес в один технологический установ.

Разъемный корпус облегчает сборку. Интересна конструкция входного вала. Для нарезания зубьев не нужно делать занижения вокруг венца, что способствует значительному повышению жесткости

вала. Редуктор собран смещениями валов с колесами в найденное центральное положение с последующей фиксацией этого положения в опорах.

Для того чтобы при сборке избежать грубых ошибок, у парных колес размещают центральное сечение по середине одинаковых по ширине венцов. У собранной "арка в арку" передачи торцы венцов лежат в одной плоскости, что может быть проконтролировано визуально и на ощупь.

#### Выводы

1. Арочные зубчатые передачи проявят свои положительные качества только в результате сборки, обеспечившей совмещение центральных сечений парных колес в одной плоскости.

2. Проблемы сборки можно решить конструкцией опор валов и созданием условий самоцентрирования или регулирования искомого положения колес.

#### Библиографический список

1. Пат. РФ № 2404030. Способ изготовления цилиндрических колес с арочными зубьями / В.Д. Плахтин, И.Г. Панков, А.П. Давыдов и др. заявка № 2009114308 от 16.04.2009, зарегистрировано 20.11.2010.

2. Пат. РФ № 2447975. Способ изготовления арочных зубьев цилиндрических зубчатых колес / А.Н. Виноградов, А.П. Давыдов, С.И. Липатов и др. Заявка № 2011104561 от 08.02.2011, зарегистрировано 20.04.2012.

3. Пат. РФ № 246783. Способ изготовления цилиндрических зубчатых колес с арочными зубьями / А.П. Давыдов, С.И. Липатов, Р.Б. Марголит и др. заявка № 201100521/02 от 11.01.2011, зарегистрировано 27.11.2012.

4. Эвольвентные арочные передачи. Инновационная технология высокопроизводительного изготовления / А.Н. Виноградов и др. // Альманах "Деловая слава России". 2011. № 3 (31).

5. Пат. РФ № 126076. Редуктор и мотор-редуктор с таким редуктором / А.Н. Виноградов, А.П. Давыдов, И.Г. Панков, А.Н. Паршин. Заявка № 2012146052/11 от 29.10.2012, зарегистрировано 20.03.2013.

![](_page_33_Picture_0.jpeg)

УДК 621.757

Б.Ю. Житников, д-р техн. наук (Владимирский юридический институт), Ю.З. Житников, д-р техн. наук (Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева) E-mail: kgta\_tms@mail.ru

# Определение величины пластической деформации поверхностей соударяемых деталей

Дана количественная оценка пластической деформации поверхностей при соударении штыря шагового конвейера при торможении о жесткозакрепленный упор.

The quantitative estimation of size of plastic deformation of surfaces is given at impact of the probe of the step-by-step conveyor at braking about rigidly fixed emphasis.

Ключевые слова: конвейер, удар, упругая и пластическая деформации, предельная скорость движения.

Keywords: conveyor, blow, elastic and plastic deformations, speed limit of movement.

Для выявления надежной и долговечной работы машин и механизмов возникает необходимость определения величин пластической деформации поверхностей соударяемых деталей о жесткозакрепленный упор при заданных скоростях их движения.

Рассмотрим на примере решение данной задачи. Пусть требуется определить пластическую деформацию сферических поверхностей штыря шагового конвейера о жесткозакрепленный упор при ударе.

Введем исходные данные:

 $v_0 = 25 \text{ см/с} - \text{скорость движения шагового кон$  $вейера;}$ 

 $\sigma = 250 \text{ H} - \text{сила тяжести шагового конвейера с расположенными на нем собираемыми узлами;$ 

 $R_1 = 25$  мм — радиус сферической части штыря;

 $R_2 = 30$  мм — радиус сферической части жесткозакрепленного упора;

сталь 45 — материал штыря и упора;

 $[\sigma_{cM}] = 56 \ {\rm krc}/{\rm MM}^2 -$ допустимое напряжение материалов штыря и упора на смятие;

40 HRC – твердость выбранных материалов;

 $E = 2 \cdot 10^6 \, \mathrm{krc/cm^2} - \mathrm{модуль} \, \mathrm{упругости} \, \mathrm{выбранныx}$  материалов.

Воспользуемся выражением предельной скорости движения тел при ударе о жесткозакрепленную поверхность преграды [2, 3]:

$$v_{0} = \sqrt{\frac{2\left(0,9\left[\sigma_{cM}\right]S_{cM} + 2\pi R_{np}\frac{900\,000}{130 - \text{HRC}}h_{nn}\right)(\alpha_{y} + h_{nn})}{m}}$$
(1)

где  $S_{\rm cm}$  — площадь пятна смятия взаимодействующих поверхностей при ударе;

*R*<sub>пр</sub> – приведенный радиус кривизны поверхностей;

α<sub>v</sub> – упругая деформация поверхностей;

*h*<sub>пл</sub> – пластическая деформация поверхностей.

Путем преобразования выражения (1), учитывая площадь пятна контакта  $S_{\rm cm} = \pi a^2$ , найдем выражение пластической деформации взаимодействующих поверхностей штыря и упора:

$$4\pi R_{\rm np} \frac{900\,000}{130 - \rm HRC} h_{\rm nn}^{2} + 2\left(0.9\left[\sigma_{\rm cm}\right]\pi a^{2} + 2\pi R_{\rm np} \frac{900\,000}{130 - \rm HRC}\alpha_{\rm y}\right)h_{\rm nn} + (2) + (2 \times 0.9\left[\sigma_{\rm cm}\right]\pi a^{2}\alpha_{\rm y} - v_{0}^{2}m) = 0,$$

где *а* — полуось пятна контакта взаимодействующих поверхностей.

Обозначим:

$$4\pi R_{\rm np} \frac{900\,000}{130-{\rm HRC}} = A; \qquad (3)$$

$$2(0.9[\sigma_{\rm cm}]\pi a^2 + 2\pi R_{\rm np}\frac{900\,000}{130 - \rm HRC}\alpha_{\rm y}) = B; \quad (4)$$

$$2 \cdot 0,9 [\sigma_{\rm cm}] \pi a^2 \alpha_{\rm y} - v_0^2 m = C.$$
 (5)

Тогда выражение (2) с учетом выражений (3)–(5) будет иметь вид:

$$Ah_{\rm nn}^2+Bh_{\rm nn}+C=0,$$

ИЛИ

$$h_{nn}^{2} + \frac{B}{A}h_{nn} + \frac{C}{A} = 0.$$
 (6)

Обозначим:

$$\frac{B}{A} = p; \quad \frac{C}{A} = q. \tag{7}$$

Тогда с учетом выражений (7) выражение (6) примет вид:

$$h_{nn}^2 + p h_{nn} + q = 0.$$
 (8)

Корни данного уравнения можно определить по формуле

$$h_{\rm nn} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 + q}$$
 (9)

Положительные значения корней и дают значения пластических деформаций сферических поверхностей штыря и упора.

Найдем численное значение пластической деформации взаимодействующих сферических поверхностей штыря шагового конвейера и жесткозакрепленного упора.

Предварительно найдем размер полуоси пятна контакта взаимодействующих поверхностей, который зависит от их конфигураций, согласно работам [4–7]:

$$a = \frac{1,109^3 \cdot 0,9[\sigma_{\rm cm}] \pi R_1 R_2}{E (R_2 - R_1)} = 0,162 \,\,\mathrm{cm}.$$

Глубина упругой деформации, которая зависит от конфигурации взаимодействующих поверхностей, определяется согласно работам [2–7] как

$$\alpha_{y} = 1,231_{3} \sqrt{\frac{0,9^{2} [\sigma_{cm}]^{2} 4\pi^{2} a^{4} (R_{2} - R_{1})}{B^{2} R_{1} R_{2}}} = 2,78 \cdot 10^{-3} \text{ cm}.$$

Приведенный радиус кривизны взаимодействующих поверхностей согласно работам [6, 7] равен:

$$R_{\rm np} = \sqrt{\frac{R_{11} R_{12} R_{21} R_{22}}{(R_{11} + R_{12}) (R_{21} + R_{22})}} = 1,624 \text{ cm},$$

где 
$$R_{11} = R_{12} = R_1$$
;  $R_{21} = R_{22} = R_2$ 

Коэффициент р согласно выражению (7):

$$-p = \frac{C}{A} = 0,00006677.$$

Коэффициент q согласно выражению (7):

$$q = \frac{B}{A} = 0,006845$$

Суммарная пластическая деформация взаимодействующих поверхностей штыря и упора согласно выражению (9)

$$h_{nn} = 0,00897 \text{ см},$$
  
 $h_{nn}^{\text{III}} = \frac{h_{nn}}{2} = 0,00413 \text{ см}$ 

Известно из литературы, при первом ударе возникает до 90 % суммарной деформации поверхности, а в дальнейшем при многократных ударах деформация возрастает не более чем на 10 %.

Если полученная деформация поверхностей не влияет на точность позиционирования, то такую конструкцию шагового конвейера с заданными параметрами можно предложить для эксплуатации в условиях производства.

Если же влияет, то следует увеличить диаметральные размеры сферических поверхностей штыря и жесткозакрепленного упора.

#### Библиографический список

1. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В 2 т. Т. 2. М.: Наука, 1979. 543 с.

2. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: THT, 2009. 656 с.

3. Житников Ю.3. Автоматизация сборки резьбовых соединений: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 Теоретические основы автоматизированной сборки изделий с резьбовыми соединениями. Ковров: КГТА, 1996. 132 с.

4. Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Ручной одношпиндельный гайковерт ударного действия повышенной точности с системой контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 6. С. 13–16.

5. Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросова Ю.Н. Способ повышения точности моментов затяжки при сборке резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами ударного действия // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 9. С. 9–12.

6. Демидов С.П. Теория упругости: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 432 с.

7. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

![](_page_35_Picture_0.jpeg)

УДК 681.5.08

**А.Д. Измайлов, А.А. Плешаков, А.Ю. Горелова, М.Г. Кристаль,** *д-р техн. наук* (Волгоградский государственный технический университет) *E-mail: crysmar@mail.ru* 

# Повышение точности измерения диаметров отверстий деталей

Предложен производительный способ измерения диаметра номинально цилиндрического отверстия детали, позволяющий компенсировать погрешности базирования измерительного устройства относительно измеряемой поверхности. Приведены аналитические выражения, описывающие данный способ и алгоритм его осуществления.

An efficient way of measuring the diameter of nominally cylindrical holes in parts has been proposed. This way allows to compensate the basing error of measuring device relative to the surface being measured. Analytical expressions describing method and algorithm of its implementation have been brought.

Ключевые слова: измерение отверстия, диаметр, датчик.

Keywords: measuring hole, diameter, sensor.

Известна практика применения в машиностроении механических контактных методов для прямых измерений диаметров отверстий деталей, например, с помощью нутромеров и микрометров.

Известен способ [1], в котором измерительную головку с двумя радиальными датчиками устанавливают внутрь измеряемого отверстия детали, после чего деталь или головку вращают относительно оси отверстия детали и по величине разностного и суммарного сигналов, одновременно снимаемых с датчиков, определяют диаметр отверстия детали.

Недостатком данного способа является наличие погрешности базирования измерительной головки внутри отверстия детали.

Для компенсации этого недостатка авторами предложен способ измерения номинально цилиндрического отверстия детали на основе измерительной головки с индуктивными датчиками, который позволяет учесть влияние погрешности базирования, обеспечить необходимую точность и производительность измерений за счет проведения дискретного числа измерительных действий. Способ состоит в следующем.

Перед началом измерительных работ измерительную головку, имеющую ось вращения с центром в точке O (рис. 1), с двумя закрепленными в ней на одной оси индуктивными датчиками, устанавливают в произвольное место контролируемого сечения детали. Это положение принимают как начальное. При этом радиус r поворота головки относительно центра O постоянно ортогонален оси закрепления датчиков.

Далее измерительную головку последовательно поворачивают на угол 90° три раза. Поворот головки именно на такой угол позволяет определить смещение оси вращения измерительной головки относительно оси отверстия детали по соответствующим осям координат в выбранной декартовой системе координат.

В каждом из положений измерительной головки получают значения разности  $U_{-}$  и суммарного сигналов  $U_{+}$  индуктивных датчиков.

Начальное положение измерительной головки, для которого угол поворота  $\phi = 0^{\circ}$ , показано на рис. 1.

![](_page_35_Figure_18.jpeg)

Рис. 1. Начальное положение измерительной головки

Суммарный сигнал  $U_+$ , снимаемый с датчиков, соответствует хорде AB:

$$U_{+} = AB$$
.

В то же время для разностного сигнала  $U_{-}$  справедливо соотношение:

$$\Delta y = \frac{BC - AC}{2} = \frac{U_{-}}{2}$$

Аналогичным образом определяется отклонение  $\Delta x$  при повороте измерительной головки на угол  $\varphi = 90^{\circ}$ .

После определения отклонений  $\Delta x$  и  $\Delta y$  положения оси вращения измерительной головки относительно центра сечения контролируемой поверхности детали, можно сделать вывод о том, в какую из координатных четвертей декартовой системы координат смещен центр  $O_1$  измеряемой поверхности.

Так, если  $U_{-}^{\phi=0^{\circ}} > 0$ ,  $U_{-}^{\phi=90^{\circ}} > 0$ , то центр  $O_{1}$  смещен в I квадрант системы координат; при  $U_{-}^{\phi=0^{\circ}} > 0$ ,  $U_{-}^{\phi=90^{\circ}} < 0$ , центр  $O_{1}$  смещен во II квадрант, если  $U_{-}^{\phi=0^{\circ}} < 0$ ,  $U_{-}^{\phi=90^{\circ}} < 0$ , то центр  $O_{1}$  смещен в III квадрант, а при  $U_{-}^{\phi=0^{\circ}} < 0$ ,  $U_{-}^{\phi=90^{\circ}} > 0$  центр  $O_{1}$  смещен в IV квадрант.

Диаметр D измеряемого отверстия определяют из прямоугольного треугольника  $AO_1D$  (рис. 2).

Здесь отрезок  $AO_1$  соответствует радиусу измеряемого отверстия детали, отрезок AD равен половине хорды AB, т.е. половине суммарного сигнала  $U_+$ , отрезок  $O_1D$  можно найти как  $O_1D = r + \Delta x$ .

Таким образом, диаметр измеряемого отверстия, в зависимости от того, в какой квадрант будет смещен относительно начала выбранной системы координат центр  $O_1$  измеряемой поверхности, определится по формулам:

$$D = 2\sqrt{\left(\frac{U_{+}^{\phi=0^{\circ}}}{2}\right)^{2} + \left(r + \frac{U_{-}^{\phi=90^{\circ}}}{2}\right)^{2}}$$

при  $U_{-}^{\phi=0^{\circ}} > 0$ ,  $U_{-}^{\phi=90^{\circ}} > 0$ ;

$$D = 2\sqrt{\left(\frac{U_{+}^{\phi=270^{\circ}}}{2}\right)^{2} + \left(r + \frac{U_{-}^{\phi=0^{\circ}}}{2}\right)^{2}}$$

![](_page_36_Figure_14.jpeg)

Рис. 2. Определение диаметра отверстия

при 
$$U_{-}^{\phi=0^{\circ}} > 0$$
,  $U_{-}^{\phi=90^{\circ}} < 0$ ;

$$D = 2\sqrt{\left(\frac{U_{+}^{\phi=180^{\circ}}}{2}\right)^{2} + \left(r + \frac{U_{-}^{\phi=90^{\circ}}}{2}\right)^{2}}$$

при  $U_{-}^{\phi=0^{\circ}} < 0, U_{-}^{\phi=90^{\circ}} < 0;$ 

$$D = 2\sqrt{\left(\frac{U_{+}^{\phi=90^{\circ}}}{2}\right)^{2} + \left(r + \frac{U_{-}^{\phi=0^{\circ}}}{2}\right)^{2}}$$

при  $U_{-}^{\phi=0^{\circ}} < 0$ ,  $U_{-}^{\phi=90^{\circ}} > 0$ .

Кроме повышения производительности за счет ограниченного числа дискретных поворотов измерительной головки, предлагаемый способ позволяет повысить точность измерения диаметра отверстия детали путем учета погрешности базирования измерительной головки внутри измеряемого отверстия.

Аналогичным образом можно определять и внешний диаметр цилиндрической поверхности за счет размещения датчиков на скобе с вынесенным центром вращения. При этом алгоритм действий и расчетные зависимости не меняются.

#### Библиографический список

1. А.с. 1580140 СССР. Способ измерения диаметра отверстия детали / М.Г. Кристаль, Р.Н. Кулагин, О.С. Харькин, В.Н. Петров // И.Б. 1990. № 7.

![](_page_37_Picture_0.jpeg)

УДК 678.027.7

А.Е. Шерышев, канд. техн. наук (Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского – МАТИ, Москва),
М.А. Шерышев, д-р техн. наук (Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва),
Е.А. Трунова (Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского – МАТИ, Москва)
Е-mail: lew1967@mail.ru

### Модель свободного термоформования изделий с относительно малой глубиной формования в произвольной пройме

Рассмотрен процесс свободного термоформования изделий, к оптическим свойствам которых предъявляются повышенные требования. Для изделий, формуемых в проймах сложной конфигурации, предложен аналитический вариант расчета их геометрических параметров, основанный на методах конформных преобразований.

This article covers the process of free thermomolding of products, whoseoptical properties must meet exclusive requirements. For products, molded inodd-shaped sleeves, we offer analytical calculation of geometrical dimensions, based on the conformal mapping method.

**Ключевые слова:** термоформование, пройма, изделие, расчет, конфигурация.

**Keywords:** thermoforming, armhole, product, calculation, configuration.

При производстве изделий, к которым предъявляют особые требования по прозрачности и качеству поверхности, одним из способов их изготовления является *метод свободного термоформования*. Известно, что свободное формование происходит без соприкосновения материала заготовки с формующим инструментом. Чаще всего последний просто отсутствует. Его заменяет специальная рама (пройма), которая наряду с перепадом давления определяет конфигурацию будущего изделия [1].

При свободном формовании заготовку закрепляют в пройме (рис. 1), установленной над вакуумной или пневматической камерой, нагревают и затем формуют, не касаясь стенок камеры. При этом деформация заготовки продолжается до тех пор, пока не наступит равновесие между действующим на лист усилием формования и напряжением, возникающим при этом в самом термопласте. Если равенство напряженного состояния не наступает, то деформация заготовки будет продолжаться вплоть до разрыва формуемого листа.

Основной проблемой при осуществлении метода свободного термоформования является отсутствие полного соответствия между устанавливаемыми технологическими параметрами и геометрией получаемых изделий. Решение этой проблемы возможно лишь при постоянном контроле за изменением геометрии заготовки в процессе формования. Для этого необходимо разработать математические модели, позволяющие описывать процесс деформирования заготовки и управлять им на протяжении всего формования.

Особое внимание при разработке этих моделей приходится уделять описанию непрерывного изменения геометрических форм заготовки в процессе формования из нее готового изделия. Отсутствие общего решения, позволяющего описать процесс свободного формования в пройме произвольной конфигурации, не дает возможности прогнозировать геометрию целого ряда сложных изделий еще на стадии подготовки их производства.

В работе [2] был рассмотрен способ описания поверхности формуемой заготовки на одной из конечных стадий свободного термоформования в проймах произвольной формы. Однако при производстве изделий с незначительной глубиной формования описанная модель не применима, так как известно [3], что в процессе свободного формования заготовка может принимать различные формы в зависимости от глубины формования. На промежуточной стадии формования при глубинах, соизмеримых с радиусом фор-

![](_page_37_Figure_15.jpeg)

Рис. 1. Свободное термоформование

![](_page_38_Figure_1.jpeg)

Рис. 2. Сложная пройма:

1 — контур проймы; 2 — касательная к контуру проймы в точке А

муемого изделия, образующие поверхности могут быть описаны полиномами второй степени [3].

Разберем способ построения математической модели для переходной зоны с глубиной формования, соизмеримой с максимальным радиусом проймы для пройм произвольной формы.

Как предложено в работе [2], контур проймы может быть разбит на несколько фрагментов, удовлетворяющих условию, по которому у полученных областей контура проймы не существует точек, в которых касательная, проведенная к этой точке, не совпадала бы с прямой, проходящей через эту точку и центр системы координат, помещенный внутрь контура проймы (рис. 2). Таким образом, решение распадется на несколько подзадач, причем число этих подзадач будет зависеть от конфигурации контура проймы. Например, пройма, представленная на рис. 2, будет иметь два

![](_page_38_Figure_7.jpeg)

![](_page_38_Figure_8.jpeg)

самостоятельных контура, а решение разобьется на две подзадачи (рис. 3, a).

Они связаны между собой, так как имеют общую линию раздела *BC*. Отметим, что в отличие от всех остальных участков разбитых контуров, по линии *BC* заготовка не защемлена проймой, что определяет новые граничные условия для этого участка контура.

Рассмотрим линию очерка формуемой заготовки, находящуюся под прямой *BC* (рис. 3,  $\delta$ ). Эта линия может быть описана различными уравнениями в зависимости от глубины формования заготовки или углом  $\alpha$  между плоскостью проймы и касательной к линии очерка в точке *C*, согласно методикам, предложенным в работе [2]. В пределах от  $\alpha = 0$ до  $\alpha = 50^{\circ}$  линия очерка описывается известным уравнением цепной линии.

В результате разбиения пройма распадается на два топологических одинаковых объекта (рис. 4). Фигуры могут быть трансформированы методами конформного преобразования [3] в геометрические объекты простых форм, например окружность, эллипс, квадрат, прямоугольник и т.д. В качестве примера приведем вариант расчета с преобразованием проймы в две фигуры с контурами, описанными эллипсами, при этом линия рассечения проймы будет преобразована в дуги  $B_1C_1$  и  $B_2C_2$  соответствующих эллипсов.

В связи с тем, что оба эллипса симметричны относительно своих центральных осей, проанализируем процесс формоизменения 1/4 части каждого из полученных фрагментов листовой заготовки.

Запишем уравнение эллипса в виде

$$\begin{cases} X / \rho_{\text{max}} = \cos t ; \\ Y / \rho_{\text{min}} = \sin t \end{cases}$$
(1)

и произведем замену, пусть  $X^* = X / \rho_{max}$ , а  $Y^* = Y / \rho_{min}$ .

В уравнении (1)  $\rho_{max}$  – диаметр описывающей контур проймы окружности;  $\rho_{min}$  – диаметр вписанной в форму проймы окружности; t – текущий угол (рис. 5).

![](_page_38_Figure_18.jpeg)

Рис. 4. Топологическая схема рассеченного контура проймы

СБОРКА В

![](_page_39_Figure_2.jpeg)

Рис. 5. Контур эллиптической проймы

В результате замены система уравнений (1) для рассматриваемых фрагментов имеет вид:

$$\begin{cases} X^* = \cos t \; ; & X_1^* = \cos t \; ; \\ Y^* = \sin t \; , & Y_1^* = \sin t \; . \end{cases}$$
(2)

Системы уравнений (2) соответствуют уравнениям окружности с единичным радиусом в новых системах координат  $X^*Y^*$  и  $X_1^*, Y_1^*$ , т.е. окружности радиусом *R*, описывающие контур проймы, будут иметь вид:

$$\begin{cases} X^* = R \cos t ; & X_1^* = R \cos t ; \\ Y^* = R \sin t , & Y_1^* = R \sin t . \end{cases}$$
(3)

Преобразование системы координат из  $X_i Y_i$  в  $X_i^* Y_i^*$  дает возможность определить не только контур каждого фрагмента, но и любую точку, находящуюся в новых или старых системах координат.

Для каждого из фрагментов выполним развертки 1/4 части круга соответственно в системах координат  $X^*Y^*$  и  $X_1^*Y_1^*$ . Эти развертки в системе координат *R*, *t* будут иметь вид прямоугольников со сторонами, равными единице и  $\pi/2$  (рис. 6).

От описания проймы сложной конфигурации перейдем к рассмотрению поверхности заготовки, формуемой в этой пройме. Для этого представим поверхность 1/4 заготовки, ограниченную контуром прямоугольника, используя способ описания поверхностей, предложенный Кунсом [4]. Согласно этому способу поверхность каждого из фрагментов можно представить в параметрическом виде:

$$f(u, v) = (1-u) f(0, v) + uf(1, v) f(u, 0) + + vf(u, 1) - (1-u)(1-v) f(0, 0) - u(1-v) f(1, 0) - -v(1-u) f(0, 1) - uvf(1, 1) ,$$
(4)

где 
$$u = R$$
,  $v = \frac{2t}{\pi}$ 

![](_page_39_Figure_13.jpeg)

Рис. 6. Контур 1/4 части описываемой проймы в системе координат *R*, *t* 

Для каждой подзадачи, описывающей часть параметрической модели заготовки для зон  $B_i D_i$  (см. рис. 4), граничные условия f(u, 0), f(u, 1), f(0, v), f(1, v) имеют следующий вид:

$$f(0, v) = \begin{cases} r(0, v) = 0\\ t(0, v) = \frac{\pi}{2}v \quad ; f(u, 1) = \begin{cases} r(u, 1) = \rho_{\max}U\\ t(u, 1) = \frac{\pi}{2}\\ z(u, 1) = \\ = \frac{k}{2}(e^{x/k} + e^{-x/k}) \end{cases}$$
$$f(1, v) = \rho_{\max}\\ t(1, v) = \frac{\pi}{2}v \quad ; f(u, 0) = \begin{cases} r(u, 0) = \rho_{\max}U\\ t(u, 0) = 0\\ z(u, 0) = \\ = \frac{k}{2}(e^{x/k} + e^{-x/k}) \end{cases}$$

$$f(0, 1) = \begin{cases} r(0, 1) = 0 \\ t(0, 1) = \frac{\pi}{2} ; f(1, 0) = \begin{cases} r(1, 0) = \rho_{\max} \\ t(1, 0) = 0 \\ z(1, 0) = 0 \end{cases}; \\ f(1, 1) = \frac{\pi}{2} \\ z(1, 1) = \\ z(1, 1) = \\ = \frac{k}{2}(e^{x/k} + e^{-x/k}) \end{cases}; f(0, 0) = \begin{cases} r(u, 0) = 0 \\ t(u, 0) = 0 \\ z(u, 0) = \\ = \frac{k}{2}(e^{x/k} + e^{-x/k}) \end{cases}$$

Для зоны, ограниченной дугами  $B_iC_i$  (см. рис. 4), граничные условия f(u, 0), f(u, 1), f(0, v), f(1, v) имеют следующий вид:

$$f(1, v) = \begin{cases} r(1, v) = R_{\max} \\ t(1, v) = \frac{\pi}{2}v \\ z(1, v) = b_0 + \\ + b_1\alpha + b_2\alpha^2 \end{cases}; f(u, 0) = \begin{cases} r(u, 0) = \rho_{\max}U \\ t(u, 0) = 0 \\ z(u, 0) = \\ = b_0 + b_1\alpha + b_2\alpha^2 \end{cases};$$

$$f(0, v) = \begin{cases} r(0, v) = R_{\max} \\ t(0, v) = \frac{\pi}{2v} \\ z(0, v) = h \end{cases}; f(u, 1) = \begin{cases} r(u, 1) = R \\ t(u, 1) = \frac{\pi}{2} \\ z(u, 1) = \\ = b_0 + b_1 \alpha + b_2 \alpha^2 \end{cases}; (8)$$

$$f(0, 1) = \begin{cases} r(0, 1) = 0 \\ t(0, 1) = \frac{\pi}{2} ; f(1, 0) = \begin{cases} r(1, 0) = \rho_{\max} \\ t(1, 0) = 0 ; \\ z(0, 1) = H_{\max} \end{cases}$$
(9)  
$$f(1, 1) = \begin{cases} r(1, 1) = \rho_{\max} \\ t(1, 1) = \frac{\pi}{2} ; ; f(0, 0) = \begin{cases} r(1, 0) = 0 \\ t(1, 0) = 0 \\ z(1, 0) = H_{\max} \end{cases}$$
(9)

где *H* – глубина в зоне пересечения двух полупройм; *H*<sub>max</sub> – максимальная глубина заготовки;

 $\rho_{max}$  — диаметр описывающей контур проймы окружности;

R – радиус в точке;

*R*<sub>max</sub> – максимальный радиус окружности.

Подставим в уравнения (4) их граничные условия (6)-(9) для соответствующих зон  $(B_iC_i \, \text{ и } B_iD_i)$ . Получим: для зоны  $B_iC_i$ 

$$\begin{cases} r(u, v) = R(u, v) \\ t(u, v) = t(v) \\ z(u, v) = \rho^{*}(u) - v[\rho^{*}(u) - \rho^{**}(u) - \rho^{***}(u)] \end{cases}$$
(10)

где  $\rho^*$ ,  $\rho^{**}$ ,  $\rho^{***}$  – глубина проймы на этапах формования;

$$R(u, v) = u(1-v); t(v) = \frac{\pi v}{2}.$$

• для зоны *B<sub>i</sub>D<sub>i</sub>* 

$$\begin{cases} r(u, v) = R(u) \\ t(u, v) = t(v) \\ z(u, v) = \rho^{*}(u) - v[\rho^{*}(u) - \rho^{**}(u)] \end{cases}$$
(11)

где  $R(u) = u; t(v) = \frac{\pi v}{2}$ .

Параметры *H* зависят от угла α и способы их определения показаны в работе [5].

Таким образом, системы уравнений (10) и (11) позволяют построить в параметрических координатах поверхность, образованную заготовкой при ее формовании в сложной пройме для промежуточной глубины.

В результате поверхность в зоне  $C_i D_i$  будет иметь вид:

$$\begin{cases} x^{**} = u (1 - v) \cos (\pi v / 2) \\ y^{**} = u (1 - v) \sin (\pi v / 2) \\ z = \rho^{*}(u) - v [\rho^{*}(u) - \rho^{**}(u) - \rho^{***}(u)] \end{cases}$$
(12)

а в зоне  $B_i D_i$ 

$$\begin{cases} x^{**} = u \cos(\pi v / 2) \\ y^{**} = u \sin(\pi v / 2) \\ z = \rho^{*}(u) - v [\rho^{*}(u) - \rho^{**}(u) \end{cases}$$
(13)

В статье предложенная модель помогает на стадии подготовки производства прогнозировать форму и размеры проймы для деталей с незначительной глубиной формования и в конечном итоге расширить номенклатуру и повысить качество изделий, получаемых методом свободного формования.

#### Библиографический список

1. Шерышев М.А. Производство изделий из полимерных листов и пленок. СПб.: Научные основы и технологии, 2011. 556 с.

2. Шерышев А.Е., Шерышев М.А. К расчету геометрических параметров изделий, полученных свободным термоформованием в проймах произвольной формы // Пластические массы. 2012. № 2. С. 31–34.

3. **Куликов С.Н., Шерышев А.Е., Шерышев М.А.** Возможные варианты уточнения модели свободного термоформования изделий в круглой пройме / Науч. труды. Вып. 17 (89). М.: МАТИ, 2010. С. 50–53.

4. Гусев К.В., Шерышев А.Е., Шерышев М.А. Расчет геометрии изделий, полученных методом свободного термоформования в эллиптических проймах // Пластические массы. 2009. № 5. С. 20–22.

5. **Коваленко В.А.** Влияние технологических параметров негативного пневмо-вакуумного формования на разнотолщинность получаемых изделий. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2002. 17 с.

![](_page_40_Picture_27.jpeg)

-000000000

### В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

#### УДК 621.71

В.С. Григорьев, Н.А. Миронычев, канд-ты техн. наук (Пензенский государственный университет) E-mail: minial@bk.ru

# Описание системы допусков и посадок с позиции синергетики

Дано описание основных понятий действующей системы допусков и посадок с применением методологии синергетики. Приведен и описан граф взаимосвязей задействованных ресурсов при образовании посадок с позиции синергетического подхода.

Description of basic concepts of the operating system of tolerances and landings with the use of methodology of synergetics is given. Interaction graph of the involved resources in fit formation from synergetics point of view is brought and described.

**Ключевые слова:** система, допуск, посадка, отклонение, фазовое пространство, аттрактор, флуктуация, бифуркация, точка бифуркации.

**Keywords:** system, tolerance, fit, deviation, phase space, attractor, fluctuation, bifurcation, point of bifurcation.

Синергетика в научном сообществе рассматривается как парадигма возникновения, самоорганизации и саморазвития открытых систем и затрагивает практически все области научных и прикладных знаний о природе и в сферах человеческой деятельности, т.е. носит, по сути, междисциплинарный характер. В связи с этим представляет научный и практический интерес возможность перенесения ее понятийного аппарата и методологии познания на описание понятий и построения разных систем в прикладных инженерных дисциплинах, например, такой как "Система допусков и посадок гладких соединений" в курсе "Метрология, стандартизация и сертификация" [1].

Для реализации этой возможности на базе синергетической парадигмы, с учетом принятого в ней понятийного аппарата (например, тезаурус, фазовое пространство, флуктуация, бифуркация, точка бифуркации, аттрактор, селектор, детектор и др.), рассмотрим структуру новых понятий, адекватных применительно к существующим понятиям в действующей системе допусков и посадок [2].

Итак, приведем основные термины, принятые в существующей системе допусков и посадок, с позиции синергетического подхода.

*Номинальный размер* — линейный аттрактор (размер) фазового пространства, служащий началом проявления его флуктуации.

*Нулевая линия* — линия, соответствующая линейному аттрактору и от которой устанавливают пределы проявления его флуктуации (при графическом изображении допусков и посадок).

*Верхнее отклонение* — верхний предел проявления флуктуации линейного аттрактора.

*Нижнее отклонение* – нижний предел проявления флуктуации линейного аттрактора.

*Допуск* — мера проявления флуктуации линейного аттрактора.

*Действительный размер* – линейный аттрактор, отражающий текущую меру его флуктуации.

Поле допуска — область фазового пространства, заключенная между верхним и нижним пределами проявления флуктуации линейного аттрактора.

*Основное отверстие* — отверстие, у которого нижний предел проявления флуктуации линейного аттрактора совпадает с линией начала проявления его флуктуации.

Основной вал — вал, у которого верхний предел проявления флуктуации линейного аттрактора совпадает с линией начала проявления его флуктуации.

Основные отклонения — тезаурус (совокупность) в системе допусков и посадок ближайших верхних или нижних пределов проявления флуктуации линейных аттракторов относительно линий начала проявления их флуктуации.

*Квалитет* — совокупность мер проявления флуктуации линейных аттракторов, рассматриваемых как соответствующие одному уровню точно-

![](_page_42_Figure_1.jpeg)

Рис. 1. Графическое представление описания взаимосвязей отдельных понятий системы допусков и посадок с их синергетическим описанием

сти для всех линейных аттракторов фазового пространства.

Единица допуска — множитель в формулах мер проявления флуктуации линейных аттракторов, являющийся функцией линейного аттрактора и служащий для определения значения меры проявления флуктуации линейного аттрактора.

*Точность* — степень приближения текущей меры флуктуации линейного аттрактора к его номинальной величине.

Графическое представление описания отдельных понятий системы допусков и посадок с позиций синергетики (рис. 1) позволяет устанавливать системные взаимосвязи с понятиями широкого круга прикладных дисциплин, например, таких как стандартизация, метрология, проектирование и технология производства изделий, надежность систем и др.

Так, при выборе посадки номинальные размеры вала d и отверстия D в ней назначают из стандартных рядов предпочтительных чисел R5-R40 и отражают собой совпадающий с нулевой линией 0-0 аттрактор.

Размер аттрактора при проектировании посадок определяется исходя из функциональных требований к ним, например, прочности, жесткости, конструктивных соображений и др.

При этом нулевая линия 0-0 служит началом отсчета флуктуаций аттракторов, т.е.  $f_A$  и  $f_Z$  для отверстия,  $f_a$  и  $f_z$  для вала, а их направление и мера оп-

ределяют положения основных отклонений относительно нулевой линии. В свою очередь сами основные отклонения являются местом (точка, линия) проявления флуктуации аттрактора при нормировании поля допуска и назначения одновременно в его пределах отклонений формы и шероховатости поверхностей сопрягаемых деталей.

Следует отметить, что возможность применения методологии синергетики к описанию терминов системы допусков и посадок позволило убедиться в системном обосновании принципов ее построения и саморазвития. Используя приведенные новые определения терминов в системе допусков и посадок на базе синергетики, отразим их применение в графе взаимосвязей как задействованных ресурсов при образовании посадок (рис. 2).

Выбор и обоснование определенного вида посадки из тезауруса 1 системы допусков и посадок осуществляется через точку бифуркации вида соединения 2, состоящего из отверстия 3 и вала 4, с образованием аттрактора как перечня посадок 5, который делится на посадки с зазором (S) 6, натягом (N) 7 и переходные (с S или N) 8. В свою очередь указанные посадки в своих точках бифуркации 6, 7 и 8 могут образовываться в системе отверстия 9, 11 и 13 и системе вала 10, 12 и 14.

Так, например, посадка с зазором 6 в системе отверстия 9 может осуществляться соединением деталей различной формы поверхности с точкой бифуркации 15, т.е. цилиндрической 16 и неци-

![](_page_43_Figure_1.jpeg)

![](_page_43_Figure_2.jpeg)

1 – тезаурус системы допусков и посадок; 2 – точка бифуркации соединения; 3 – отверстие; 4 – вал; 5 – аттрактор как перечень посадок; 6 – посадки с зазором; 7 – посадки с натягом; 8 – переходные посадки; 9, 11 и 13 – посадки в системе отверстия; 10, 12 и 14 –посадки в системе вала; 15 – точка бифуркации формы поверхности отверстия и вала; 16 – цилиндрическая форма поверхности; 18 и 19 – соответственно диапазон размеров от 1 до 500 мм; 20 – номинальный размер соединения; 21 – номинальный размер отверстия; 22 – квалитет; 23 и 24 – диапазон квалитетов от 5 до 12; 25 – требуемый квалитет; 26 – основное отверстия; 31 – номинальный размер вала; 32 – квалитет; 33 и 34 – диапазон квалитетов от 5 до 12; 35 – требуемый квалитет; 36 – основные отклонения вала от "a" до "h"; 37 – поле допуска; 38 – верхнее отклонение вала; 39 – нижнее отклонение вала; 40 – предельные размеры вала; 41 – требуемая посадка в системе отверстия с зазором (аттрактор)

линдрической 17 в диапазоне размеров от 1 мм 18 до 500 мм 19 с принятым номинальным размером соединения 20. На номинальный размер отверстия 21 назначают квалитет 22 в диапазоне от 5-го 23 до 12-го 24 с требуемым значением 25 и основным отклонением отверстия 26 "Н", равным нулю, и полем допуска 27, расположенным выше нулевой линии. Поле допуска 27 определяет верхнее 28 и нижнее 29 отклонения отверстия и его предельные размеры 30.

Далее для образования посадки с зазором в системе отверстия в графе согласно рисунку на номинальный размер вала 31 назначают квалитет 32 и диапазон от 5-го 33 до 12-го квалитета 34 с требуемым значением 35 и необходимым основным отклонением вала 36 от "а" до "h," т.е. с полем допуска 37. Поле допуска 37 характеризуется верхним 38 и нижним 39 отклонениями и предельными размерами 40.

При соединении двух деталей, т.е. отверстия и вала, с соответствующими предельными размера-

ми 30 и 40 образуется посадка с зазором 41, значение которого в ней должно находиться в пределах от  $S_{\min}$  до  $S_{\max}$ .

В заключение следует отметить, что приведенный граф взаимосвязей применяемых ресурсов при образовании посадок позволяет наглядно представить последовательность их получения, а также описать их в терминах и структурой на междисциплинарном языке синергетики.

#### Библиографический список

1. Смолко В.А. Концепции современного естествознания: учеб. пособие. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. 768 с.

2. Марков Н.Н. Нормирование точности в машиностроении. М.: Издательство "Станкин", 1992. 320 с.

3. Григорьев В.С. Синергетический подход к описанию системы допусков и посадок // Инноватизация в России: успехи, проблемы и перспективы: сб. статей IV Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: Приволжский Дом знаний, 2011. С. 81–84.

### **PA3HOE**

УДК 628.9

#### С.А. Микаева, д-р техн. наук, А.С. Микаева

(Московский государственный университет приборостроения и информатики) E-mail: mikaeva@pechkin.npo.lit.ru

# Адаптивная модель сборки комплекта "люминесцентная лампа – импульсный электронный полупроводниковый пускорегулирующий аппарат высокой частоты"

Экономия электроэнергии является важной народно-хозяйственной задачей. Одним из путей ее решения является переход на питание люминесцентных ламп импульсами тока повышенной (20...50 кГц) частоты. Представлены результаты исследований собранного комплекта, состоящего из разрядных ламп низкого давления при их питании импульсами тока повышенной частоты, а также адаптивная математическая модель для расчета излучения основной резонансной линии ртути длиной волны  $\lambda$  = 253,7 нм.

Saving of power is currently an important national economic task. One of the ways to solve it is to switch power supply of luminescent lamps pulses of current high (20...50 kHz) frequency. The research results collected set consisting of discharge lamps of low pressure at their feeding current impulses of high-frequency and adaptive mathematical model for calculating radiation of the main resonance line mercury wavelength  $\lambda = 253,7$  nm were ptresented.

Ключевые слова: люминесцентная лампа, математическая модель, импульсный режим, математическая модель, импульсный электронный пускорегулирующий аппарат, концентрация электронов, концентрация возбужденных атомов, ионизация.

**Keywords:** fluorescent lamp, mathematical model, pulsed mode, adaptive model, switching electronic ballast, electron concentration, concentration of the excited atoms, ionization.

Экономия электроэнергии путем повышения эффективности сборки комплекта "люминесцентная лампа – пускорегулирующий аппарат" (ЛЛ–ПРА) является важной народнохозяйственной проблемой. Одним из путей повышения эффективности сборки комплекта ЛЛ–ПРА видится в переходе на питание люминесцентных ламп импульсами тока повышенной (20...50 кГц) частоты.

Для этого необходимо провести замену традиционных электромагнитных ПРА на полупроводниковые электронные пускорегулирующие аппараты повышенной частоты (ПЭПРА ВЧ). Импульсное питание люминесцентной лампы (ЛЛ) – один из наиболее интересных способов питания, хотя бы потому, что импульсные электрические и излучательные характеристики ЛЛ несут большое количество информации о динамических свойствах газового разряда низкого давления.

Известно также, что импульсный режим — наиболее благоприятный для работы транзисторов с точки зрения минимальных потерь мощности в них. Потому в настоящей работе исследован импульсный режим питания ЛЛ. Цель работы — разработка и сборка адаптивной модели ЛЛ с целью ее использования для проведения расчетов контура, содержащего ЛЛ и импульсный электронный полупроводниковый пускорегулирующий аппарат (ИЭППРА).

В связи с тем, что современные ЛЛ являются одним из самых массовых источников света и их номенклатура достаточно широка, ограничимся исследованием наиболее распространенных типов ЛЛ в трубках-колбах диаметром 36 и 26 мм. Наполнение ламп — аргон и ртуть, давление инертного газа 3 мм рт. ст. (400 Па).

Адаптивная модель ЛЛ должна быть максимально простой, пригодной для использования в инженерных расчетах, обладать достаточной точностью.

Для решения поставленной задачи была использована математическая модель переменной структуры [1], которая позволяет в процессе накопления экспериментальных данных, шаг за шагом, усложнять модель и уточнять значения коэффициентов, входящих в уравнения модели. Усложнение структуры модели должно проводиться на основе сравнения экспериментальных и расчетных характеристик ЛЛ, уточнение входящих в уравнения коэффициентов – на базе экспериментальных результатов.

Методика разработки и сборки модели ЛЛ включает в себя следующие этапы:

• выбор определяющих параметров модели;

• выбор структуры дифференциального уравнения первого порядка с постоянными коэффициентами для расчета излучательных характеристик ЛЛ;

• определение коэффициентов, анализ точности модели;

• уточнение коэффициентов в уравнениях, определение их зависимости от режимов работы, построение уравнений с переменными коэффициентами;

• анализ точности и поверка адекватности модели.

![](_page_45_Picture_1.jpeg)

В качестве основных определяющих параметров модели ЛЛ будем считать концентрацию электронов и концентрацию возбужденных атомов в состоянии  $6^{3}P_{1}$  (рассматривая электронную температуру как меру средней энергии электронов, характеризующую частоту их столкновения с нормальными атомами, электронов и возбужденных атомов и т.д.).

Рассмотрим вопрос выбора структуры дифференциального уравнения для расчета характеристик излучения ЛЛ. Эту структуру можно представить в следующем виде:

$$\frac{d\Phi}{dt} = Q^*(n_e, N_0, N_1, \alpha_i) - S^*(n_e, N_1, \beta_i), \qquad (1)$$

где  $Q^*(n_e, N_0, N_1, \alpha_i)$  — функция, отражающая зависимость скорости образования возбужденных атомов ртути, ответственных за излучение разряда;

*n*<sub>e</sub> - концентрация электронов;

*N*<sub>0</sub> – концентрация нормальных атомов ртути;

 $N_1$  — концентрация возбужденных атомов в состоянии  $6^3 P_1$ ;

 $\alpha_i$  – скорость ионизации;

 $S^*(n_e, N_1, \beta_i) - функция, отражающая зависимость скорости разрушения возбужденных атомов и выхода излучения из разряда;$ 

 $\beta_i$  — скорость рекомбинации.

Используя классические представления о механизме образования возбужденных атомов в плазме низкого давления с наполнением ртуть — инертный газ принимаем, что концентрация возбужденных атомов (конкретно на излучающем уровне  $6^{3}P_{1}$ ) пропорциональна концентрации нормальных атомов ртути, концентрации электронов, а также вероятности возбуждающих соударений нормальных атомов с электронами, причем образование возбужденных атомов происходит непосредственно из нормального состояния в результате ударов 1-го рода с электронами и поглощения фотонов, прилетающих в рассматриваемый объем из окружающей массы газа.

Краткая методика подхода к составлению дифференциальных уравнений для ЛЛ включает:

• проведение анализа физических процессов в рассматриваемой ЛЛ и компонент плазмы, ответственных за ее состояние;

• выделение наиболее характерных из них, которые являются основными источниками электрической энергии, поступающей в ЛЛ, а также излучения ЛЛ;

• выбор их в качестве определяющих параметров;

 выбор наиболее приемлемой (с точки зрения точности и простоты) модели расчета электрических параметров ЛЛ;

• выделение преобладающего процесса образования возбужденных атомов, ответственных за излучение ЛЛ и запись его аналитического выражения;

• выделение преобладающего процесса, с которым связано разрушение возбужденных атомов ртути;

• на основании этого — запись выражения для скорости протекания этого процесса; • запись уравнения динамического баланса излучающих атомов исходя из равенства скоростей образования и разрушения возбужденных атомов ртути.

Окончательными этапами при построении адаптивной модели ЛЛ будут:

• уточнение коэффициентов модели;

• определение их зависимости от режимов работы;

• построение уравнения с переменными коэффициентами.

Далее проводят всестороннюю проверку модели на соответствие следующим требованиям:

• точность соответствия модели реальным процессам в ЛЛ;

• непрерывность модели, т.е. определение границ ее применимости;

• простота модели;

• возможность использования в инженерных расчетах реальных режимов работы комплекта ЛЛ-ПРА.

Исходя из общих принципов построения модели принята следующая структура уравнения для расчета концентрации возбужденных атомов ртути на излучающем уровне:

$$\frac{dN_1}{dt} = \alpha_0 N_0 n_e - \beta_{10} N_1 n_e - \frac{N_1}{\tau_{30}}, \qquad (2)$$

где т<sub>эф</sub> – эффективная скорость амбиполярной диффузии.

Первый член правой части уравнения характеризует процессы образования возбужденных атомов и процессы заселения излучающего уровня 6<sup>3</sup>P<sub>1</sub>. Второй член определяет скорость разрушения возбужденных атомов. И, наконец, третий член правой части уравнения зависит от процессов так называемого "пленения" излучения в разряде низкого давления.

Проанализируем это уравнение. Для этого сначала примем следующие допущения:

• поток излучения спектральной линии длиной волны  $\lambda = 253,7$  нм пропорционален заселенности излучающего уровня  $6^{3}P_{1}$ , т.е. концентрации возбужденных атомов  $N_{1}$  на этом уровне;

• средняя концентрация электронов в разряде низкого давления в смеси инертный газ — ртуть пропорциональна приведенной проводимости лампы *g*<sub>л</sub>.

Первое допущение не противоречит классическим представлениям о физических процессах в разряде. Второе допущение предложено и детально исследовано в работе [1]. На основе этих допущений уравнение можно переписать в виде

$$\frac{d\Phi_{254}}{dt} = \alpha_{01} N_0 g_{\pi} - \beta_{10} \Phi_{254} g_{\pi} - \frac{\Phi_{254}}{\tau_{9\Phi}}, \qquad (3)$$

где  $\Phi_{254}$  — поток излучения резонансной линии  $\lambda = 253,7$  нм.

Рассматривая математические модели для расчета параметров положительного столба на основе учета физических

процессов, происходящих в нем, можно отметить, что определение вероятностей прямых и обратных процессов – задача довольно трудная, и до настоящего времени нет абсолютной уверенности в точности определения их численных значений. Поэтому авторы решили не пользоваться литературными источниками, а принять эти вероятности постоянными коэффициентами в уравнении, а абсолютные значения этих коэффициентов находить из эксперимента. К тому же, следует заметить, что величина α<sub>01</sub> (скорость ионизации) сильно зависит от параметров электрического поля, в то время как величина β<sub>10</sub> (скорость рекомбинации) зависит от параметров поля слабо. Тогда, с учетом того, что концентрация нормальных атомов ртути N<sub>0</sub> – величина в наших условиях постоянная и не зависящая от параметров электрического поля, уравнение для расчета потока излучения  $\Phi_{254}$ имеет вид:

$$\frac{d\Phi_{254}}{dt} = M_2(E) g_{\pi} - M_3 \Phi_{254} g_{\pi} - M_4 \Phi_{254}.$$
(4)

Здесь  $M_2(E)$ ,  $M_3$  и  $M_4 = 1 / \tau_{a\phi}$  – неизвестные коэффициенты, определяемые экспериментально.

В первом приближении принимаем, что коэффициент  $M_2$  не зависит от тока лампы, но зависит от градиента потенциала E, или, приближенно, от напряжения на лампе.

Для универсализации расчетов авторами приведено нормирование потока излучения по номинальному значению  $\Phi_{254_{\rm HOM}}$ . При этом

$$\Phi_{254}^{\text{OTH}} = \frac{\Phi_{254}^0}{\Phi_{254_{\text{HOM}}}},$$
(5)

где  $\Phi_{254}^0$  — поток излучения линии 253,7 нм при значениях тока и напряжения на лампе  $I_{n.o}$  и  $U_{n.o}$  (номинальные значения тока и напряжения);

 $\Phi_{254_{HOM}}$  — поток излучения линии 253,7 нм при номинальном значении тока и напряжения ЛЛ на постоянном токе.

Тогда при  $\Phi_{254}^0 = \Phi_{254} \Phi_{254}^{oth} = 1$ . Окончательно уравнение (4) для расчета потока излучения можно записать в виде

$$\frac{d\Phi_{254}^{\text{OTH}}}{dt} = M_2 u_{\pi} g_{\pi} - M_3 \Phi_{254}^{\text{OTH}} g_{\pi} - M_4 \Phi_{254}^{\text{OTH}} .$$
(6)

Анализ полученных экспериментальных результатов в работе [2], а также расчетов, проведенных по адаптивной модели с постоянными коэффициентами, позволил сделать вывод, что принятые при создании модели допущения позволяют проводить расчеты потока линии 253,7 нм в импульсном режиме при известной статической зависимости потока от тока (проводимости) лампы, или при известном его номинальном значении.

На втором этапе конструирования модели примем следующие допущения: скорость протекания прямых и обратных процессов зависит от градиента потенциала. Тогда уравнение (6) можно записать в виде:

$$\frac{d\Phi_{254}^{\text{ont}}(t)}{dt} = M_2(u_{\pi}) g_{\pi} - M_3(u_{\pi})\Phi_{254}^{\text{ont}} g_{\pi} - M_4\Phi_{254}^{\text{ont}} , \quad (7)$$

где  $u_{\rm n}$  – мгновенные значения напряжения на лампе.

Начальные условия для этого уравнения остаются те же. Коэффициенты  $M_2(u_n)$  и  $M_3(u_n)$  были определены исходя из геометрического смысла производной. Коэффициент  $M_4$ считался известным.

Решая систему двух алгебраических уравнений находим значения коэффициентов  $M_2$  и  $M_3$  при  $u_n$  = const. Затем строили зависимости коэффициентов  $M_2$  и  $M_3$  от относительного напряжения  $u_n / U_{n.o}$ . Получалась кривая, имеющая экспоненциальный характер.

Были проведены расчеты коэффициентов  $M_2$  и  $M_3$  в зависимости от напряжения на лампе  $u_n(t)$  и амплитуды тока (I = 0,3...0,7 А). Найдены аппроксимирующие выражения для зависимостей  $M_2 = \zeta(u_n / U_{n,o})$  и  $M_3 = \varphi(u_n / U_{n,o})$ :

$$M_2 = C_0 \left( u_{\pi} / U_{\pi,0} \right)^{c_1} \exp C_2 \left( u_{\pi} / U_{\pi,0} \right), \tag{8}$$

$$M_{3} = d_{0} \left( u_{\pi} / U_{\pi,o} \right)^{d_{1}} \exp d_{2} \left( u_{\pi} / U_{\pi,o} \right).$$
(9)

В уравнениях (8) и (9)  $c_1$  и  $d_1$  – коэффициенты уравнений, определяемые экспериментально. При этом коэффициент  $M_4$  = const при  $P_{\text{Ar}}$ ,  $d_{\text{тр}}$  = const.

Аналогичные измерения и расчеты были проведены для ЛЛ в колбах диаметром  $d_{\text{тр}_2} = 26$  мм и  $d_{\text{тр}_3} = 16$  мм.

После обработки результатов оказалось, что значения всех коэффициентов зависят от диаметра трубки (тогда как остальные параметры были примерно одинаковы). Коэффициент  $M_4$ , так же как и в трубке с диаметром  $d_{\rm Tp} = 36$  мм, в первом приближении можно принять постоянным при  $d_{\rm Tp} = {\rm const}$ , но зависящем от диаметра (увеличивается с уменьшением диаметра колбы). Коэффициенты  $M_2(u_n)$  и  $M_3(u_n)$  зависят от диаметра ЛЛ и от амплитуды тока в им-пульсе.

В итоге проведенных исследований модель электрических характеристик ЛЛ и расчета потока излучения линии 253,7 нм имеет вид

$$\begin{cases}
U_{n.o} = U_{n.u} (I_{n.o} / I_{n.u})^{\rho}; \\
\frac{dg_{\pi}}{dt} = M_{1} (u_{\pi}) g_{\pi}; \\
G_{\pi} = \frac{g_{\pi}}{1 + K_{1} (u_{\pi} / U_{\pi.o} - 1)}; \\
\Phi_{254}^{0} = \Phi_{254}^{\text{HOM}} (G_{\pi} / G_{\pi_{\text{HOM}}})^{\gamma}; \\
\frac{d\Phi_{254}}{dt} = M_{2} (u_{\pi}) g_{\pi} - M_{3} (u_{\pi}) \Phi_{254} g_{\pi} - M_{4} \Phi_{254}.
\end{cases}$$
(10)

ſ

![](_page_47_Figure_1.jpeg)

Схема импульсного электронного полупроводникового пускорегулирующего аппарата

Аппроксимирующие выражения для коэффициентов  $M_1(u_n), M_2(u_n)$  и  $M_3(u_n)$  следующие:

$$M_{1}(u_{\pi}) = \begin{cases} a_{0} (u_{\pi} / U_{\pi,0})^{2} - a_{1} (u_{\pi} / U_{\pi,0}) - a_{2} , \\ a_{0} \langle u_{\pi} / U_{\pi,0} - b_{1} + b_{2} \exp[-b_{3} (u_{\pi} / U_{\pi,0} - 1)] \rangle \end{cases}; (11)$$

$$M_{2}(u_{\pi}) = C_{0} (u_{\pi} / U_{\pi,0})^{c_{1}} \exp c_{2} (u_{\pi} / U_{\pi,0}); \qquad (12)$$

$$M_{3}(u_{\pi}) = d_{0} \left( u_{\pi} / U_{\pi,0} \right)^{d_{1}} \exp d_{2} \left( u_{\pi} / U_{\pi,0} \right).$$
(13)

Здесь  $a_i$ ,  $b_i$  и  $d_i$  – коэффициенты уравнений, определяемые экспериментально.

В качестве примера импульсного питания разрядных ламп авторами разработана и собрана схема ЭПРА на базе шимконтроллера IR2153, который имеет минимальное число элементов. Контроллер IR2153 содержит в себе встроенный генератор и драйвер управления полумостовым инвертором на MOSFET транзисторе. Рассмотрим более подробно сборку схемы, представленной на рисунке. Она состоит из входного выпрямителя; блока инвертора и схемы розжига лампы.

Входной выпрямитель собран из конденсаторов С1, С2, С3, С4 и С5 (фильтр), катушки L1, диодного моста VD1. Блок инвертора собран из входного источника напряжения для питания шимконтроллера IR2153, выполненного на элементах R1, С6. На элементах R2', R2, С7 выполнена вре-

мязадающая RC цепочка для встроенного генератора IR2153.

На элементах VD2 и C8 выполнен умножитель напряжения для обеспечения надежной работы встроенного драйвера и входных транзисторов VT1 и VT2. Конденсатор C9 предназначен для сглаживания входного напряжения и согласования с трансформатором T1, а также для уменьшения насыщения трансформатора T1.

Блок включения выполнен и собран на полупроводниковом выпрямителе, состоящем из элементов VD4, C10, VD3, R5 и T1, которые образуют импульсное зажигающее устройство.

В результате проведенной работы разработана адаптивная модель для расчета излучательных параметров разрядных ламп низкого давления. Предложена и собрана схема импульсного питания ламп различной мощности.

#### Библиографический список

1. **Краснопольский А.Е.** Дифференциальная аппроксимация вольт-амперных характеристик люминесцентных ламп // Светотехника. 1978. № 12. С. 10–11.

2. Мальцев Е.Г. Экспериментальные исследования излучения люминесцентных ламп при импульсном питании токами повышенной частоты. Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники, электротехники энергетики: Сб. науч. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф. Саранск, 14 декабря 2011 г. Саранск: СВМО, 2011. С. 115–118.

ООО "Издательство Машиностроение", 107076, Москва, Стромынский пер., 4 Учредитель ООО "Издательство Машиностроение". Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru; редакции журнала: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97. Технический редактор Жиркина С.А. Корректоры Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е. Сдано в набор 05.03.14 г. Подписано в печать 30.04.14 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена. Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение". Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, г. Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.