ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

3 2016 (188)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Калачев О.Н., Екимов О.А. Особенности методики экранной сборки цифрового прототипа в CAD Inventor Autodesk 3

Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Анализ условий управляемости для систем автоматизированной сборки 7

Транспортирование объектов сборки

Иванов Ю.В. Оптимизация транспортных операций сборки электронных модулей в роботизированном комплексе ГАСК многономенклатурного производства 15

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Плешаков А.А., Кристаль М.Г. Экспериментальное исследование пневмоэлектронного измерительного устройства для автоматической сортировки деталей перед селективной сборкой 23

Экология и безопасность сборочных работ

Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И. Сборка установки удаления запахов контейнерного типа 28

В помощь конструктору, технологу

Алпатов А.Н., Кадиев А.Р., Рощин А.В. Проблемы оптимизации нагрузки в распределенных вычислительных системах. 36

Трение и смазка в машинах и механизмах

Лагунова Е.О., Гармонина А.Н., Копотун Е.А. Нелинейные эффекты воздействия электропроводящей смазки на шип подшипника, обладающего демпфирующими свойствами 40

Дубовик Е.А. Использование анаэробных материалов в трибологии 46

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — **79748**, Объединенному каталогу "Пресса России" — **84967**, каталогу "Почта России" — **60257**) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98. Факс 8 (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

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

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.

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД

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.

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ

В.И. КОЛЕСНИКОВ, акад. РАН и РИА (зам. гл. редактора)
А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОМСК

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

ТУЛА

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

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве связи и массовых коммуникаций РФ. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2016

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

3 2016 (188)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Kalachev O.N., Ekimov O.A. Features screen technique to build a digital prototype CAD Inventor Autodesk 3

Kuznetsova S.V., Simakov A.L. The analysis of conditions of controllability for automated assembly systems 7

Assembly component parts transportation

Ivanov Yu.V. Assembly of electronic modules transport operation optimization in complex robotic assembly complex in multiproduct production 15

Quality assurance. Testing. Monitoring

Pleshakov A.A., Kristal M.G. Experimental study of pneumo-electronic gauge for parts' automatic sorting prior to selective assembly 23

Ecology and safety in assembly

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Boychuk M.I. Assembly plants odor container type . 28

Industrial and design engineer's aid

Alpatov A.N., Kadiev A.R., Roschin A.V. Problems of load optimization in distributed computing systems 36

Friction & lubrication

Lagunova E.O., Garmonina A.N., Kopotun E.A. Nonlinear action effects electrically conductive lubricant on the bearing spike possessing damping properties . . 40

Dubovik E.A. Using anaerobic materials in tribology 46

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" — **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" — **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98. Fax: 8 (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.A. SHATILOV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTIUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON
V.I. KOLESNIKOV
A.A. RYZHKIN

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

SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOMSK
V.E. PANIN
A.V. KOLUBAEV

TULA
A.I. PREYS
A.A. MALIKOV

KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:
E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by Ministry of Telecom and Mass Communications of RF.
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2016

УДК 621.8:004.9

О.Н. Калачев, *канд. техн. наук,* **О.А. Екимов**
(Ярославский государственный технический университет)
E-mail: Okalachev@mail.ru

Особенности методики экранной сборки цифрового прототипа в CAD Inventor Autodesk

Рассматривается реализация парадигмы цифрового прототипирования на основе первичности 3D-модели изделия. Показаны особенности начального этапа конструкторского проектирования в CAD Inventor Autodesk с использованием инструментов ассоциативности, параметризации и адаптивности на примере создания сборки валкового механизма.

Discusses the implementation of the paradigm of digital prototyping on the basis of the primacy of the 3D-model of the product. The features of the primary stage of design CAD Autodesk Inventor using tools associativity, parameterization and adaptability for example creating build roller mechanism.

Ключевые слова: парадигма цифрового прототипирования, 3D-модель, 3D-сборка.

Keywords: the paradigm of digital prototyping, 3D-model, 3D-assembly.

Практическая реализация парадигмы цифрового прототипирования (ЦП) предполагает комплексное освоение и применение возможностей современных систем CAD/CAM/CAE. В общем случае независимо от конкретной среды проектирования конструктору необходимо последовательно пройти следующие этапы (рис. 1, см. обложку, стр. 2):

создание 3D-моделей деталей;

прочностной анализ деталей;

экранная сборка;

формирование на основе полученного цифрового прототипа изделия традиционной конструкторской документации, которая попрежнему является для большинства предприятий исходным пунктом технологической подготовки производства.

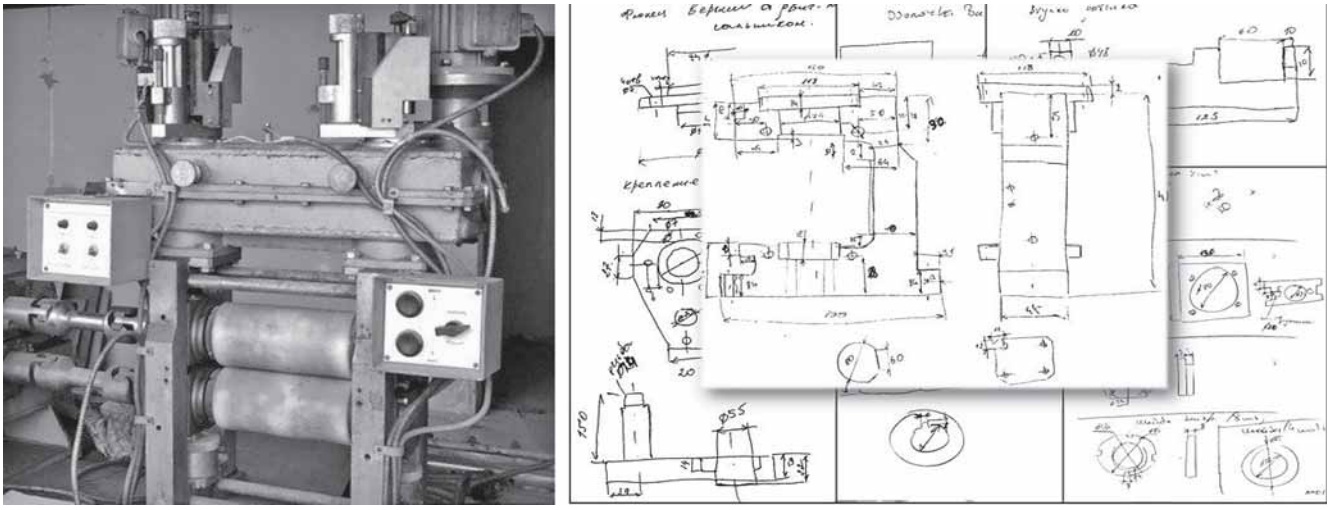
Рассмотрим реализацию парадигмы ЦП на примере проекта изделия "валковый механизм", выполненного для АО ЦПТА (Москва) в среде CAD Inventor Autodesk [1].

На рис. 2 приводятся исходная информация заказчика — подготовленный к утилизации прототип (рис. 2, *а*) — и результаты выполненного эскизирования его деталей (рис. 2, *б*).

3D-модель детали. Создание ЦП пресса в виде пространственной модели при поставленной задаче подготовки традиционной конструкторской документации повышает, на первый взгляд, трудоемкость и удлиняет цикл работ над проектом. Однако именно такой путь позволяет избежать проблем, возникающих на последующих этапах проектирования и компоновки изделия, например, из-за нестыковки деталей вследствие неизбежных ошибок в их конфигурации и размерах.

При проектировании ЦП пресса из 3D-моделей деталей использовалась схема "снизу-вверх", т.е. от создания деталей к модели сборочной единицы [2].

Создание параметрического эскиза. На первом этапе в среде *Inventor* создается эскиз базового компонента каждой детали (рис. 3). При этом вводятся ограничения и функциональные зависимости, позволяющие в дальнейшем изменять размеры, сохраняя ограничения, наложенные размерными характеристиками сопрягаемых деталей. Все размеры эскиза занесены в таблицу параметров, где им присвоено индивидуальное



а *б*

Рис. 2. Прототип пресса (*а*) и бумажные эскизы (*б*)

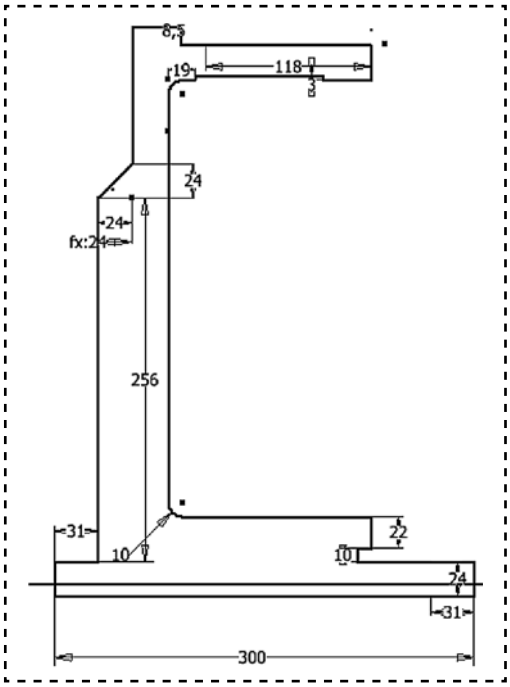
имя, определена взаимосвязь с другими размерами эскиза (рис. 4, см. обложку, стр. 2).

В результате при изменении, например, нижнего размера стойки в заданном соотношении изменится и зависимый верхний размер (рис. 5, см. обложку, стр. 2).

Твердотельное моделирование. На следующем этапе для выполнения операции твердотельного моделирования необходимо открыть базовый эскиз. Далее на панели инструментов выбрать вкладку "Выдавливание" — и в появившемся окне настроить параметры этой операции (рис. 6, см. обложку, стр. 2).

Устанавливаем, с каким типом элемента будет происходить работа (эскиз или тело), выбрать вид выдавливания. Поскольку в данном случае эскиз базовый, то доступно создание только твердого тела.

Вводим значение выдавливания и выбираем его направление. В результате появляется



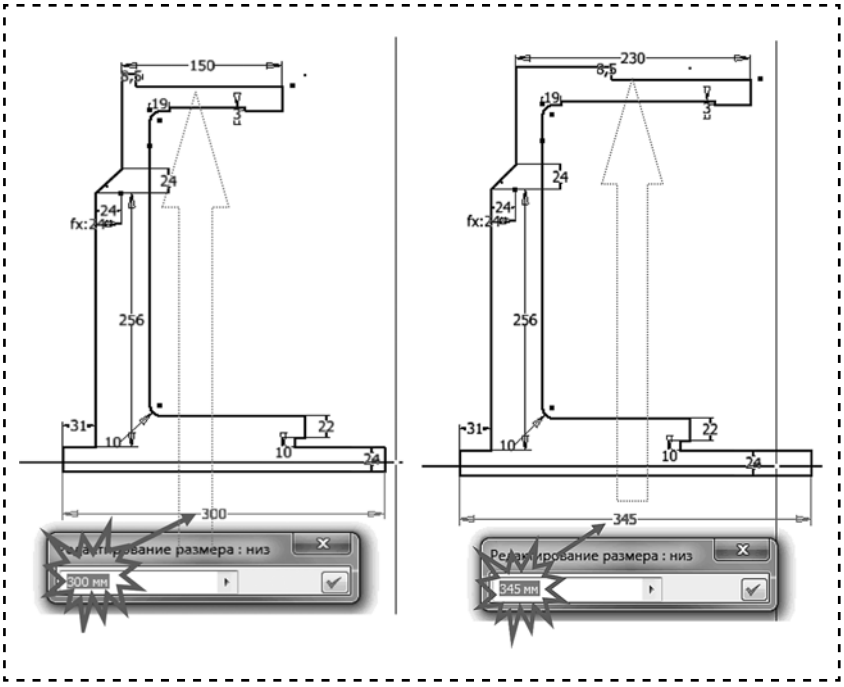


Рис. 3. Эскиз базового компонента "стойки" **Рис. 5. Параметрическое изменение размеров**

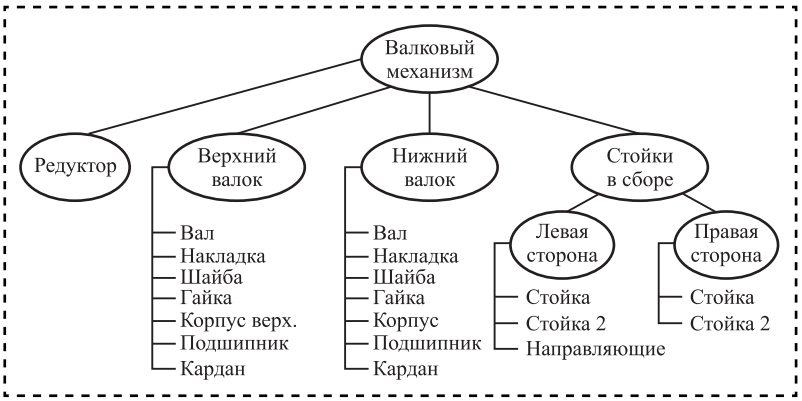


Рис. 9. Схема состава изделия

3D-модель детали с панелью быстрой настройки, где можно отредактировать параметры выдавливания (рис. 7, см. обложку, стр. 2).

Подобная методика в дальнейшем используется для проектирования и оригинальных, и стандартных деталей валкового механизма (рис. 8, см. обложку, стр. 3), структурная схема которого показана на рис. 9.

Создание экранной сборки. На этом шаге в меню *Inventor* выбираем команды "Создать сборку", "Вставить" (рис. 10, см. обложку, стр. 3) и добавляем сначала базовую деталь узла "валок", а затем все остальные детали (рис. 11).

При сборке стандартные детали заимствуются из библиотеки *Inventor*. Например, крепежные детали выделяются в библиотеке компонентов (рис. 12, см. обложку, стр. 3), далее выбирается необходимый размер (рис. 13, см. обложку, стр. 3) и положение винта демонстрируется в отверстии для крепежа. Программа автоматически создаст зависимости для такой вставки.

В ходе сборки оригинальных деталей на экране появляется всплывающее окно с вариантами их взаимного расположения (рис. 14, см. обложку, стр. 4).

Аналогичная ситуация возникает при выборе и размещении подшипника. Выбрав подходящий метод соединения вала и подшипника, а именно *совмещение*, указываем поверхности или грани, по которым происходит совмещение (рис. 15, *а*, см. обложку, стр. 4). Далее завершаем операцию, совмещая грань выбранной детали с гранью базовой (рис. 15, *б*, см. обложку, стр. 4).

Более перспективный подход при сборке состоит в наложении зависимостей на детали. С помощью вкладки "Зависимость" выбираем следующее: тип зависимости сборки — вставка; решение — с выравниванием; смещение — 0 (мм). Такой подход позволяет уйти от неточности состыковки деталей при сборке [3].

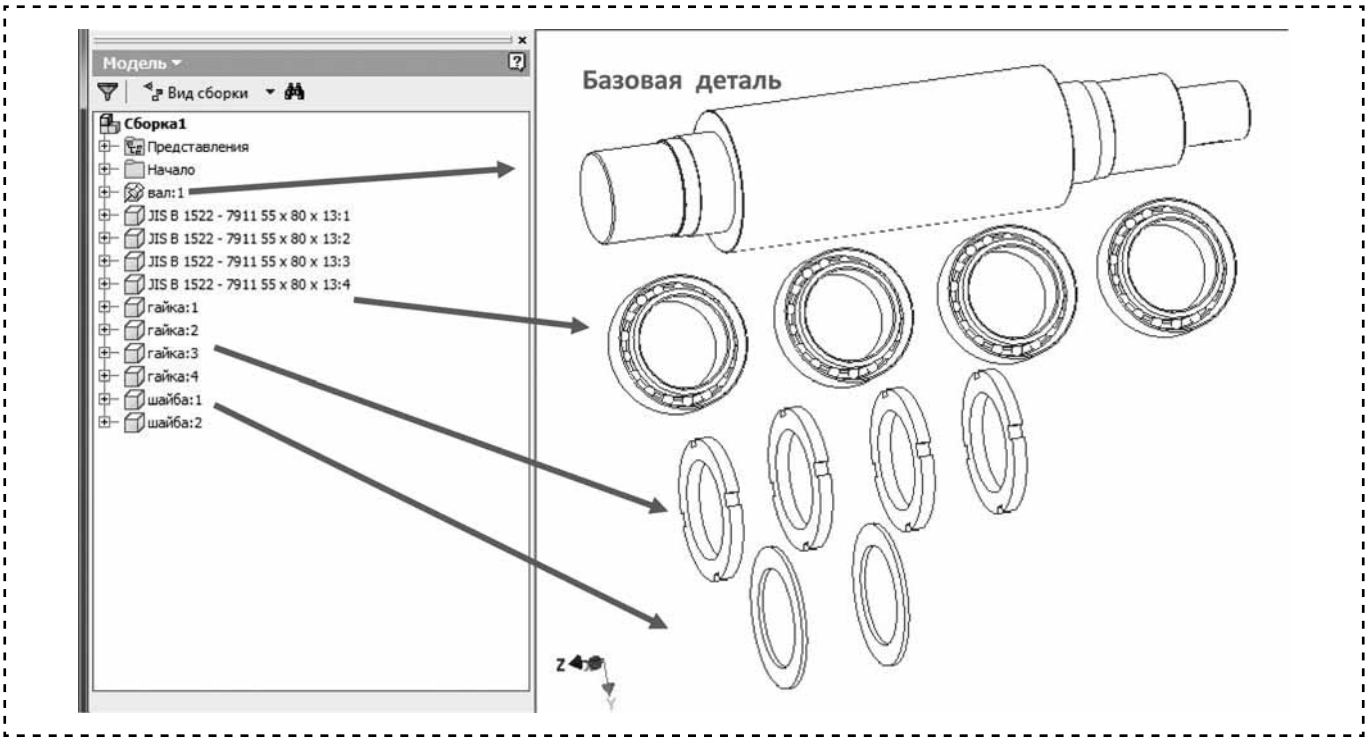


Рис. 11. Дерево модели и соответствующие геометрические объекты

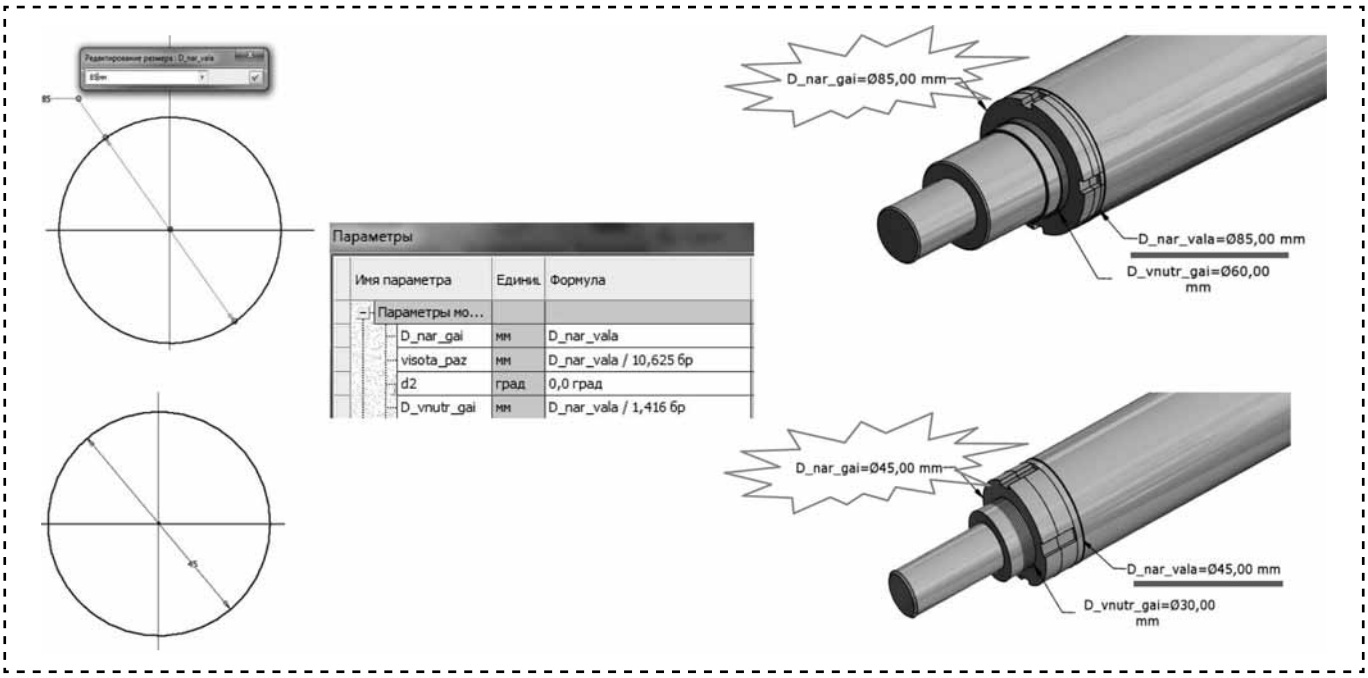


Рис. 19. Адаптивное изменение размеров деталей

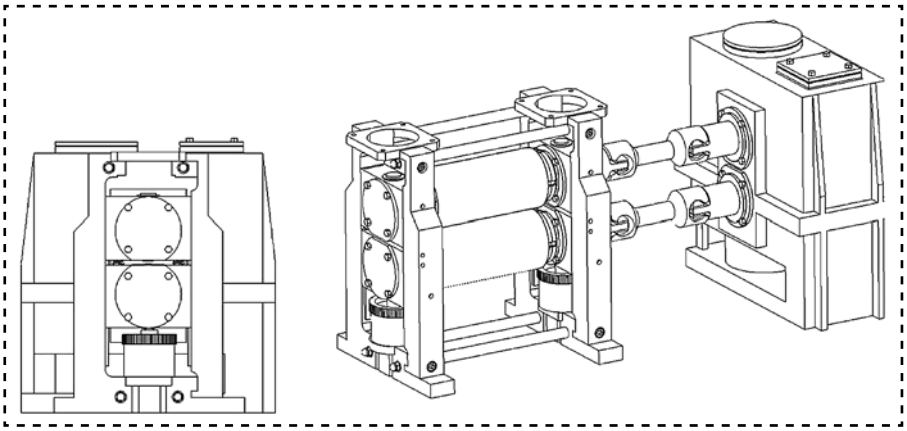


Рис. 20. Результат экранной сборки

Далее, как и в первом случае сборки, выбираем торцы (на присоединяемом показан синим цветом) на базовом объекте (рис. 16, *а*, см. обложку, стр. 4), после чего завершаем сборку, нажимая кнопку "Применить" (рис. 16, *б*, см. обложку, стр. 4).

Важным моментом в реализации парадигмы ЦП является адаптивная сборка, при которой новая модель детали возникает на основе геометрии уже созданной детали — проекция детали становится эскизом для новой 3D-модели (рис. 17, см. обложку, стр. 4).

При использовании адаптивной сборки автоматически создаются параметрические связи между размерами соединяемых деталей.

Обнаруженные ошибки устраняем, внося изменения в эскиз, присутствующий в дереве построения (рис. 18, см. обложку, стр. 4). При этом меняются размеры обеих деталей (рис. 19).

На основе приведенных приемов выполнена экранная сборка всего узла "валковый механизм" (рис. 20).

Выводы. Рассмотрен первый этап цифрового прототипирования изделия. Продемонстрирована последовательность комплексного применения возможностей *Autodesk Inventor Professional* на основе использования инструментов адаптивности, параметризации при моделировании деталей и сборке.

Библиографический список

1. **Тремблей Т.** Inventor 2013 и InventorLT 2013. Официальный учебный курс. М.: ДМК, 2013. 344 с.

2. **Калачев О.Н.** Компьютерно-интегрированное машиностроение и CAD/CAM Cimatron // Информационные технологии. 1998. № 10. С. 43—47, 49.

3. **Конинский И.А., Калачев О.Н.** Компьютерно-интегрированная подготовка механообрабатывающего производства с использованием разнородных CAD, CAPP, CAM-систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2005. № 4. С. 22—26.

(Окончание следует.)

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

Анализ условий управляемости для систем автоматизированной сборки

Обосновано необходимое условие автоматизированного совмещения соединяемых деталей. Предложена математическая модель устройства адаптации положения детали. Сформулированы условия управляемости и наблюдаемости систем адаптации положения детали при автоматизированной сборке. Проанализированы условия управляемости для активных и пассивных средств адаптации. Найдены ограничения на замыкание обратных связей для активных и пассивных средств адаптации.

The necessary condition of automated overlapping of assembled details is proved. The mathematical model of detail's position adaptation device is offered. The condition's analysis of controllability and observability for automated assembly systems is carried. The bordering of feedback closure for active and passive adaptation means are found.

Ключевые слова: автоматизированная сборка, наблюдаемость, необходимое условие совмещения, переменные состояния, средство адаптации положения детали, управляемость.

Keywords: automated assembly, observability, necessary condition of overlapping, state variable, means of detail's position adaptation, controllability.

Введение

Устройство для автоматизированной сборки представляет собой сложную динамическую систему, осуществляющую управление движением соединяемых деталей с целью совмещения их сопрягаемых поверхностей. Управляемость, а также наблюдаемость являются фундаментальными структурными свойствами любой динамической системы. Управляемость сборочной системы является необходимым условием автоматизированного совмещения соединяемых деталей, т.е. условием существования автоматического режима работы.

Необходимое условие автоматизированного совмещения соединяемых деталей

Рассмотрим возможности обеспечения необходимого условия автоматизированной сборки, а именно: реализации сборочным устройством управляемого перемещения детали по программной траектории совмещения сопрягаемых поверхностей [1]. Основные функции сборочного устройства проявляются, во-первых, в задании программной траектории движения детали, во-вторых, в формировании силового воздействия на соединяемую деталь для удержания ее на программной траектории, в-третьих, в формировании воздействий, удерживающих деталь в пределах заданной в данный момент программной ориентации.

Таким образом, устройство, обеспечивающее необходимые условия автоматизированной сборки, должно управлять как линейными, так и угловыми перемещениями соединяемой детали в любой точке программной траектории. Будем считать, что сборочное оборудование обеспечивает, в силу своей универсальности, минимальное число функций, выполняемых при сборке. К ним относятся, функция базирования соединяемых деталей и функция перемещения соединяемой детали по координате совмещения. В связи с наличием технологических и конструктивных погрешностей сборочного оборудования траектория этого перемещения не совпадает с программ-

ной траекторией совмещения сопрягаемых поверхностей:

$$\bar{q}_0(t) - \bar{q}_{\text{пр}}(t) = \bar{\delta}(t), \quad (1)$$

где $\bar{q}_0(t)$, $\bar{q}_{\text{пр}}(t)$ — текущие значения радиусов-векторов точек реальной и программной траекторий движения соединяемой детали в выбранной неподвижной системе координат; $\bar{\delta}(t)$ — текущее значение радиуса-вектора рассогласования траекторий.

Значение радиуса-вектора точек реальной траектории движения может быть выражено через матрицу инерционных параметров соединяемой детали (А) и вектор равнодействующей силы $\bar{Q}$:

$$\begin{aligned} &(\mathrm{A})\ddot{\bar{q}}_0(t) = \bar{Q}(t); \\ &q_0(t) = \iint (\mathrm{A})^{-1}\bar{Q}(t)\,dt. \end{aligned} \quad (2)$$

Представив вектор равнодействующей силы $\bar{Q}(t)$ в виде суммы всех возмущающих силовых факторов, приложенных к соединяемой детали $\bar{R}_{\text{в}}$ и управляющего воздействия, формируемого устройством $\bar{U}$ пропорционально рассогласованию $\bar{q}_0(t) - \bar{q}_{\text{пр}}(t)$, получим структуру системы управления движением соединяемой детали по программной траектории:

$$\bar{q}_0(t) = \iint (\mathrm{A})^{-1}\left[\bar{R}_{\text{в}}(t) + k\left(\bar{q}_0(t) - \bar{q}_{\text{пр}}(t)\right)\right]dt, \quad (3)$$

где k — коэффициент пропорциональности управляющего воздействия.

Представим выражение (3) в виде структурной схемы, элементами которой выполняют преобразования в соответствии с формулой (3): обращение матрицы инерционных коэффициентов, интегрирование, сложение и вычитание параметров (рис. 1).

Как следует из этой структурной схемы, управление движением соединяемой детали по программной траектории обеспечивается устройством с отрицательной обратной связью по перемещению детали. Это устройство должно выполнять перечисленные выше функции. Поскольку цель управления движением детали состоит в обеспечении неравенства:

$$\bar{\delta}(t) \leqslant \bar{\varepsilon}, \quad (4)$$

где $\bar{\varepsilon}$ — вектор допустимого рассогласования, определяемый из условий собираемости, то основной функцией устройства является адаптация (приспособление ориентации) соединяемой детали относительно базовой. Схема (см. рис. 1) является обобщенной структурной схемой адаптирующего устройства. Преобразуем ее к следующему виду (рис. 2).

В состав адаптирующего устройства, обеспечивающего управление ориентацией соединяемой детали при перемещении по программной траектории, включаются задающее устройство (ЗУ), устройство формирования управляющего воздействия (k), а также обратная связь по реальному положению соединяемой детали.

Таким образом, для обеспечения необходимых условий автоматизированного совмещения сопрягаемых поверхностей, адаптирующее устройство на всех этапах сборочной операции должно реализовать обратные связи как минимум по координатам адаптации соединяемой детали. Необходимым условием автоматизированного совмещения соединяемых деталей является замкнутость структуры адаптирующего устройства по координатам адаптации [2]. Параметры обратных связей определяют качество управления движением,

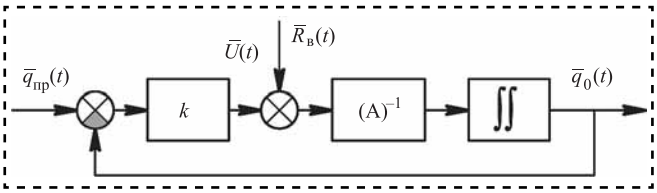


Рис. 1. Структурная схема системы управления движением соединяемой детали

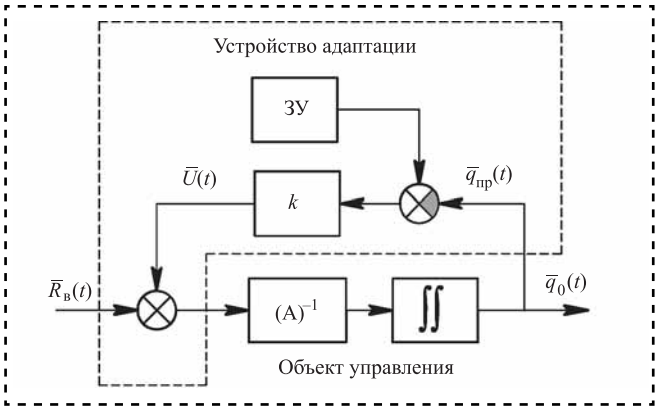


Рис. 2. Структурная схема устройства адаптации положения детали

следовательно, возникает необходимость определения дополнительных условий существования этих связей.

Математическая модель устройства адаптации положения детали

Проанализируем прямые и обратные связи в структуре адаптирующего устройства.

Прямые связи в структуре адаптирующего устройства обеспечивают программное управление движением детали, и условием их замыкания следует считать соответствие входных и выходных переменных для любых смежных функциональных элементов. В активных устройствах адаптации это условие выполняется при разработке электрокинематической схемы привода перемещения соединяемой детали. В пассивных устройствах прямые связи программного управления задаются кинематической схемой перемещения детали. Поэтому специальных требований к параметрам элементов, обеспечивающих замыкание прямых связей, не существует.

Иначе дело обстоит с замыканием обратных связей. Так как эти связи обеспечивают передачу энергии и информации между разнородными элементами, вид их не задается при выборе электрокинематической или кинематической схемы перемещения детали, и от параметров этих связей в значительной мере зависит качество управления движением, следовательно, возникает необходимость определения дополнительных условий существования этих связей. Для этого рассмотрим математическую модель устройства адаптации положения детали.

Движение соединяемой детали в адаптирующем устройстве может быть представлено обобщенной математической моделью [1]:

$$\mathrm{A}\ddot{\bar{q}}(t) + \mathrm{B}\dot{\bar{q}}(t) + \mathrm{C}\bar{q}(t) = \bar{Q}_{\text{упр}}(t) + \bar{R}_{\text{в}}(t), \qquad (5)$$

где A, B, C — соответственно инерционная матрица, матрица затухания и восстанавливающая матрица; $\bar{Q}_{\text{упр}}(t)$ — вектор управляющих воздействий; $\bar{R}_{\text{в}}(t)$ — вектор возмущающих воздействий.

Уравнение (5) обобщает возможные варианты адаптирующих устройств для совмещения осесимметричных деталей, соединяемых в направлении оси симметрии с зазором. Элементы инерционной матрицы A учитывают массу и моменты инерции подвижных частей устройства. Матрица затухания B включает коэффициенты вязкого трения при перемещении соединяемой детали по координате совмещения ($0Z$) и координатам адаптации ($0X$, $0Y$). Элементы восстанавливающей матрицы C представляют собой приведенные жесткости соединяемой детали, элементов ее крепления, механизмов перемещения по указанным направлениям. В общем случае элементы этих матриц могут зависеть от обобщенных координат соединяемой детали, составляющих вектор $\bar{q}(t)$.

Вектор $\bar{q}(t)$ представляет собой полное решение уравнения (5) и включает частное решение, определяемое видом слагаемых в правой части и общее решение, зависящее от соотношения элементов инерционной, восстанавливающей матриц и матрицы затухания.

Вектор $\bar{q}_F(t)$ может рассматриваться как результат преобразования некоторого программного воздействия, зависящего от начального значения вектора $\bar{q}_0$. Программное воздействие может задаваться внешним устройством или формироваться датчиками сборочной системы.

Рассмотрим вынужденное движение детали под действием управляющих воздействий, считая возмущения незначительными $\left(\bar{R}_{\text{в}} \cong 0\right)$. Структурная схема, соответствующая уравнению движения, представлена на рис. 3.

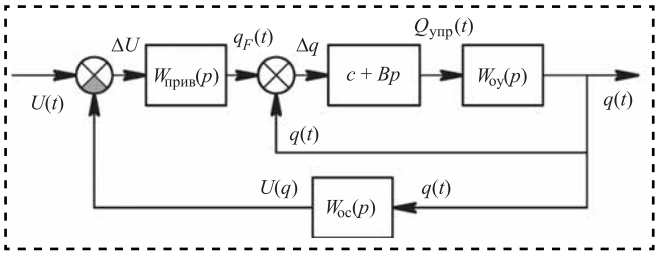


Рис. 3. Математическая модель устройства адаптации положения детали:

U — задающий (программный сигнал); q_F — программное перемещение, задаваемое приводом перемещения $W_{\text{п}}$; c — приведенная жесткость механизма перемещения; B — приведенный коэффициент вязкого трения механизма перемещения; $Q_{\text{упр}}$ — управляющее воздействие; q — действительное перемещение объекта управления $W_{\text{оу}}$; $U(q)$ — сигнал устройства обратной связи $W_{\text{ос}}$

Анализ условий управляемости и наблюдаемости систем адаптации положения детали при автоматизированной сборке

Выполнение необходимого условия автоматизированной сборки связано с понятиями управляемости и наблюдаемости системы адаптации [3].

Для системы адаптации переменные состояния соответствуют текущим значениям обобщенных координат и скоростей перемещения соединяемой детали. Параметры средства адаптации должны обеспечивать необходимое условие автоматизированной сборки — управляемое перемещение соединяемой детали по программной траектории совмещения. Это условие будет выполнено, если переменные состояния при наличии управляющего воздействия целенаправленно изменяются от начальных до конечных (требуемых условиями собираемости) значений, т.е. система адаптации управляема. Управляемость системы адаптации как свойство системы автоматического регулирования предполагает, что в ее структуре должны присутствовать элементы, позволяющие:

- по выходным координатам объекта управления определить параметры состояния системы;
- сформировать управляющее воздействие в зависимости от значения параметров состояния;
- приложить это воздействие к объекту управления для приведения его в заданное состояние.

Для определения условий управляемости системы адаптации, описываемой структурной схемой (см. рис. 3), перейдем от переменной $q(t)$ к переменным состояния системы $\bar{q} = \bar{y}$; $\dot{\bar{q}} = \bar{y}_1$. Тогда уравнения движения запишутся в виде:

$$\left.\begin{aligned} \dot{\bar{y}} &= \bar{y}_1; \\ \mathrm{A}\dot{\bar{y}}_1 + \mathrm{B}_1\bar{y}_1 + \mathrm{C}_1\bar{y} &= \mathrm{G}U \end{aligned}\right\}, \qquad (6)$$

где $\mathrm{B}_1 = \mathrm{B}\left[1 + W_{\text{пр}}(p)W_{\text{ос}}(p)\right]$;

$\mathrm{C}_1 = \mathrm{C}\left[1 + W_{\text{пр}}(p)W_{\text{ос}}(p)\right]$;

$\mathrm{G} = W_{\text{пр}}(p)\left(c + Bp\right)$.

Выходные координаты системы, в общем случае, связаны с переменными состояния уравнением наблюдения:

$$\bar{Q} = \mathrm{H}\bar{Y}, \qquad (7)$$

где $\bar{Q} = \left|q_1, q_2, \ ..., \ q_n\right|^{\mathrm{T}}$ — вектор обобщенных координат объекта управления;

$\bar{Y} = \left|\bar{y}, \bar{y}_1\right|^{\mathrm{T}}$ — вектор переменных состояния системы;

H — матрица размера $n \times m$.

Система уравнений (6) с учетом введенного вектора переменных состояния $\bar{Y}$ может быть представлена в виде матричного уравнения состояния системы:

$$\dot{\bar{Y}} = \mathrm{L}\bar{Y} + \mathrm{N}\bar{P}; \qquad (8)$$

$$\dot{\bar{Y}} = \begin{pmatrix} \dot{\bar{y}} \\ \dot{\bar{y}}_1 \end{pmatrix}; \bar{Y} = \begin{pmatrix} \bar{y} \\ \bar{y}_1 \end{pmatrix}; \mathrm{L} = \begin{pmatrix} 0 & \mathrm{E} \\ -\mathrm{A}^{-1}\mathrm{C}_1 & -\mathrm{A}^{-1}\mathrm{B}_1 \end{pmatrix};$$

$$\mathrm{N} = \begin{pmatrix} E & 0 \\ 0 & \mathrm{A}^{-1}\mathrm{G} \end{pmatrix}; \bar{P} = \begin{pmatrix} 0 \\ U \end{pmatrix},$$

где E — единичная матрица; 0 — нулевая матрица; L — матрица состояния системы; N — матрица управления системы; $\bar{P}$ — вектор управляющих воздействий.

Для систем автоматического управления, описываемых уравнениями вида (8) условия полной наблюдаемости и управляемости формализованы Р.Е. Калманом [4]. Система управляема, если ранг матрицы управляемости

$$\mathrm{D} = \left[\mathrm{N}, \ \mathrm{LN}, \ \mathrm{L}^2\mathrm{N}, \ ..., \ \mathrm{L}^{m-1}\mathrm{N}\right]$$

равен числу параметров состояния — m. Условие полной наблюдаемости системы связано с рангом матрицы наблюдаемости $\mathrm{R} = \left[\mathrm{H}^{\mathrm{T}}, \ \mathrm{L}^{\mathrm{T}}\mathrm{H}^{\mathrm{T}}, \ \left(\mathrm{L}^{\mathrm{T}}\right)^2\mathrm{H}^{\mathrm{T}}, \ ..., \ \left(\mathrm{L}^{\mathrm{T}}\right)^{m-1}\mathrm{H}^{\mathrm{T}}\right]$. Система наблюдаема, если выполнено равенство $\mathrm{rank}\mathrm{R} = m$.

Вектор пространства состояний для выбранных переменных состояния имеет размерность $m = 2$. Матрицы управляемости D и наблюдаемости R в этом случае принимают вид:

$$\mathrm{D} = \mathrm{LN}; \ \ \mathrm{R} = \mathrm{L}^{\mathrm{T}}\mathrm{H}^{\mathrm{T}}. \qquad (9)$$

Подставив в формулы (9) выражения для L, N, H = (E 0), получим:

$$D = \begin{pmatrix} 0 & A^{-1}G \\ -A^{-1}C_1 & -\left(A^{-1}\right)^2 B_1 G \end{pmatrix}; \quad R = \begin{pmatrix} 0 & -A^{-1}C_1 \\ E & -A^{-1}B_1 \end{pmatrix}. \tag{10}$$

Для обеспечения полной управляемости и наблюдаемости системы адаптации ранг этих матриц должен быть равен размерности вектора переменных состояния, т.е. двум. Это условие будет выполнено, если не равны нулю элементы $A^{-1}G$, $-A^{-1}G$. При этом условие наблюдаемости системы выполняется автоматически при обеспечении условия управляемости. Управляемость адаптирующей системы является необходимым условием автоматизированного совмещения соединяемых деталей или условием существования автоматического режима работы сборочной системы. Размерность матриц управляемости и наблюдаемости зависит от размерностей инерционной A, восстанавливающей C_1 и диссипативной B_1 матриц и, следовательно, от числа координат адаптации. Так, при одной координате адаптации размерность матриц D и R — 2×2, при двух координатах адаптации — 4×4, при трех — 6×6, и т.д. С учетом выражений для матриц G, C_1 найденные условия принимают вид:

$$A^{-1}C\left[1 + W_{\text{пр}}(p)W_{\text{ос}}(p)\right] \neq 0; \quad A^{-1}\left(c + Bp\right)W_{\text{пр}}(p) \neq 0. \tag{11}$$

Анализ полученных условий управляемости и наблюдаемости адаптирующих систем показывает, что строгое равенство нулю элементов матриц $A^{-1}G$, $-A^{-1}G$ возможно при бесконечных инерционных параметрах (масса и моменты инерции подвижной части системы) или при нулевых значениях элементов матрицы жесткости устройства и элементов передаточной матрицы привода. В реальных системах указанные параметры не могут принимать таких значений, и следовательно, условия управляемости и наблюдаемости должны выполняться. Однако возможно нарушение этих условий при работе систем на предельных динамических режимах в условиях реальных возмущений. Поэтому из условий выражений (10) могут быть найдены ограничения на параметры системы, обеспечивающие предельные режимы работы.

Для определения этих ограничений проанализируем полученные неравенства применительно к активным и пассивным средствам адаптации.

Условия замыкания обратных связей для активных средств адаптации

Первое условие выражения (11) эквивалентно системе двух неравенств:

$$\left.\begin{aligned} -A^{-1}C &\neq 0; \\ 1 + W_{\text{пр}}(p)W_{\text{ос}}(p) &\neq 0 \end{aligned}\right\}. \tag{12}$$

Выполнение первого неравенства обеспечивается для устройств с конечными инерционными и упругими характеристиками механизмов преобразования движения. Стоящее в левой части этого неравенства выражение представляет собой матрицу собственных частот механической части активного адаптирующего устройства. При рациональном выборе системы координат, связанной с выходным звеном этого механизма, частотная матрица является диагональной. Поэтому равенство нулю диагональных элементов этой матрицы (представляющих собой квадраты собственных частот механизма по каждой из степеней подвижности) возможно только в случае нулевых жесткостей механизма по соответствующим координатам. Статическая жесткость механизмов преобразования движения по координатам адаптации отлична от нуля. Однако в предельных режимах работы устройства при наличии периодических возмущений динамические жесткости механизмов преобразования движения могут иметь существенно меньшие значения, при приближении к резонансным режимам стремящиеся к нулю. Определение параметров этих режимов зависит от структуры и конструктивного исполнения механизмов преобразования движения и проводится по результатам математического моделирования динамики устройства.

Таким образом, первое неравенство накладывает ограничения по условию управляемости на режимы работы устройства или

на параметры его механической части при заданных характеристиках производительности (быстродействия). Следствием этих ограничений является выбор конструктивных параметров механизмов преобразования движения, обеспечивающих определенный уровень динамической жесткости устройства и, следовательно, уровень управляемости движением соединяемой детали.

Второе неравенство системы (11) ограничивает динамические возможности системы управления механической частью активного адаптирующего устройства. Для систем с отрицательными обратными связями (к которым относятся системы позиционного управления перемещением, системы стабилизации траектории и системы направленного поиска) и определенными запасами устойчивости в контурах управления это неравенство выполняется во всем диапазоне частот входных (управляющих) воздействий. Поэтому динамика этих систем не влияет на управляемость процесса совмещения.

Иначе обстоит дело с системами ненаправленного поиска. Реализация алгоритма ненаправленного поиска возможна в активных адаптирующих устройствах с положительными (или знакопеременными) обратными связями. В этих системах формирование поисковой траектории обеспечивается неустойчивым движением по одной из координат адаптации. В режиме положительной обратной связи второе неравенство (12) записывается в виде:

$$1 - W_{\text{пр}}(p)W_{\text{ос}}(p) \neq 0. \qquad (13)$$

Так как $W_{\text{пр}}(p)W_{\text{ос}}(p) = W_{\text{раз}}(p)$ — передаточная функция разомкнутой системы, то неравенство (11) будет выполняться на всех частотах входного воздействия, кроме частоты среза системы $\omega_{\text{ср}}$, определяемой из условия:

$$|W_{\text{раз}}(j\omega_{\text{ср}})| = 1.$$

Следовательно, на частоте среза системы управления (как правило, значительно меньшей собственных частот механической части устройства) происходит нарушение условия управляемости для устройств с положительными обратными связями. В реальных устройствах потеря управляемости может наблюдаться в диапазоне частот, близких к частоте среза $\omega_{\text{ср}}$. Это связано с нестабильностью параметров контура управления, вызванных внешними возмущениями. Поэтому второе неравенство выполняется для указанных систем во всем диапазоне частот, кроме частот $\omega = \omega_{\text{ср}} \pm \Delta\omega$. Значение $\Delta\omega$ может быть определено для конкретных систем по разбросу параметров соединяемых деталей, колебаниям коэффициентов передачи элементов контура управления и изменениям внешних возмущений.

Таким образом, для активных систем адаптации с любыми алгоритмами совмещения соединяемых деталей условия управляемости устройства, равносильные условиям существования эффективных обратных связей, сводятся к ограничениям значений собственных частот механической части системы по координатам адаптации, а для поисковых систем к ним добавляются ограничения быстродействия диапазоном частот $\omega_{\text{ср}} \pm \Delta\omega$.

Условия замыкания обратных связей для пассивных средств адаптации

Для пассивных средств адаптации в соответствии со структурной схемой рис. 3 $W_{\text{ос}}(p) = 0$, $W_{\text{пр}}(p) = 1$. Поэтому второе неравенство (12) обращается в тождество. Условия управляемости, определяемые первым неравенством и сформулированные для механической части активных систем, полностью применимы и к пассивным средствам адаптации. Уточнение этих условий для рассматриваемых устройств может быть сделано из рассмотрения их управляемости при действии возмущений, например сухого трения, инерционных сил, приведенных к соединяемой детали. На этапе предварительной адаптации условие перемещения соединяемой детали по траектории совмещения имеет вид:

$$F_{\text{дв}} \geqslant F_{\text{сопр}}.$$

Движущие силы $F_{\text{дв}}$ создаются деформацией упругого элемента, силы сопротивления $F_{\text{сопр}}$ определяются сухим трением между де-

талью и направляющей поверхностью и инерционными силами:

$$c\Delta q \geqslant fAgk + A\ddot{q}, \qquad (14)$$

где c — жесткость упругого элемента в направлении перемещения q; f — коэффициент трения; A — инерционный коэффициент (приведенная масса детали); g — ускорение свободного падения; k — коэффициент, учитывающий конструктивные особенности адаптирующего устройства ($k < 1$); $\ddot{q}$ — ускорение перемещения детали; Δq — деформация упругого элемента.

Считая движение детали равноускоренным, перепишем неравенство (13) в виде:

$$\frac{c}{A} \geqslant \frac{2}{t^2}\left(\frac{fgk}{\ddot{q}} + 1\right), \qquad (15)$$

где t — время перемещения детали на расстояние рассогласования Δq.

Обозначив $\frac{c}{A} = \omega_0^2$, $\frac{g}{\ddot{q}} = n$, получим: $\omega_0^2 \geqslant \frac{2}{t^2}(fkn + 1)$. Эта зависимость позволяет определить минимальное значение собственной частоты устройства ω_0 при заданном быстродействии t и конструктивных параметрах k, n. Исходя из условий управляемости соединяемой детали и требуемого уровня быстродействия могут быть выбраны конструктивные параметры устройства, удовлетворяющие приведенному неравенству. Так как это неравенство задает ограничение собственных частот устройства снизу, возможны варианты конструкций, обеспечивающие управляемость устройства, но имеющие низкую точность позиционирования.

Ограничение собственных частот устройства сверху может быть получено из рассмотрения точностных характеристик устройства. Будем считать, что соединяемая деталь стабилизируется относительно программной траектории совмещения упругими элементами. Относительную погрешность стабилизации, обеспечивающую условия собираемости, обозначим $q_{\min}$. Стабилизирующее действие упругого элемента имеют место как в пассивных устройствах, где он совмещает функции двигателя и позиционирующей обратной связи, так и активных системах, упругий элемент служит дополнительным звеном позиционирующей обратной связи. Предположим также, что движущее усилие создается внешним устройством, жесткость которого не меньше жесткости механизмов перемещения по координатам адаптации. В этом случае условие управляемости устройства выполняется. Адаптация детали с требуемой точностью будет обеспечена, если движущее усилие создает перемещение детали по координатам адаптации, по величине превышающее $q_{\min}$ (т.е. будут выполнены условия динамического совмещения): $q \geqslant q_{\min}$. Перемещение детали в упругом подвесе происходит под действием движущих сил и сил сопротивления:

$$q = \frac{1}{c}\left(F_{\text{дв}} - F_{\text{тр}} - F_{\text{ин}}\right). \qquad (16)$$

С учетом неравенства (15) условие совмещения примет вид:

$$F_{\text{дв}} - F_{\text{тр}} - F_{\text{ин}} \geqslant cq_{\min}.$$

Учтя зависимости для инерционных сил и сил трения, приведенные выше, получим:

$$\omega_0^2 \leqslant \frac{g}{q_{\min}}\left(\frac{F_{\text{дв}}}{G} - \frac{fnk + 1}{n}\right). \qquad (17)$$

Обозначения в этой формуле соответствуют зависимости (14). Считая перемещение равноускоренным $q_{\min} = \frac{\ddot{q}\tau_{\min}^2}{2}$, получим:

$$\omega_0^2 \leqslant \frac{2}{\tau_{\min}^2}\left[\frac{F_{\text{дв}}}{G} - (fnk + 1)\right]. \qquad (18)$$

С учетом неравенства (14) окончательно запишем:

$$2(fnk + 1)\left(\frac{1}{t^2} + \frac{1}{\tau_{\min}^2}\right) \leqslant \omega_0^2 \leqslant \frac{2nF_{\text{дв}}}{\tau_{\min}^2 G}. \qquad (19)$$

В соответствии с этой зависимостью, задавая минимальное время перемещения $\tau_{\min}$ детали, допустимое время совмещения t, соотношение $\frac{F_{\text{дв}}}{G}$, можно определить диапазон допустимых собственных частот устройства и выбрать конструктивные параметры механизма

перемещения, обеспечивающие как управляемость соединяемой детали, так и требуемый уровень быстродействия и точности. При этом параметрами, задаваемыми конструкцией, являются трение в кинематических парах (f), величина перегрузок (n), коэффициент приведения сил трения (k).

Таким образом, для пассивных средств адаптации условия замыкания обратных связей, соответствующие условиям управляемости, связаны с ограничениями минимально допустимых значений собственных частот устройств по координатам адаптации. Максимально допустимые значения этих параметров определяются из условий требуемого быстродействия и чувствительности устройства (точности позиционирования соединяемой детали).

Заключение

Предложена математическая модель устройства адаптации положения детали. Выявлено, что для обеспечения необходимых условий автоматизированного совмещения сопрягаемых поверхностей деталей, адаптирующее устройство на всех этапах сборочной операции должно реализовать обратные связи как минимум по координатам адаптации соединяемой детали, т.е. должна быть обеспечена замкнутость структуры адаптирующего устройства по координатам адаптации. Приведено описание системы адаптации положения детали в пространстве состояний. Сформулированы условия управляемости и наблюдаемости адаптирующих устройств для автоматизированной сборки. Найдены ограничения на замыкание обратных связей по координатам адаптации для активных и пассивных адаптирующих устройств.

Библиографический список

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

2. **Кузнецова С.В., Симаков А.Л.** Обеспечение необходимых условий автоматизированной сборки средствами адаптации // Материалы IV международного научно-технического семинара "Современные технологии сборки". Москва, 22—23 октября 2015 г. Университет машиностроения; под ред. И.Н. Зининой. Москва: МГИУ, 2015. С. 145 — 153.

3. **Ким Д.П.** Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: учеб. пособие. М.: Физматлит, 2007. 440 с.

4. **Калман Р., Фалб П., Арбиб М.** Очерки по математической теории систем. М.: Едиториал УРСС, 2004. 400 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

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

УДК 658.52

Ю.В. Иванов, *д-р техн. наук (Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана)*
E-mail: yvivanov@bmstu.ru

Оптимизация транспортных операций сборки электронных модулей в роботизированном комплексе ГАСК многономенклатурного производства

Оптимизация транспортных операций выполнена на основе их моделей. Модели образуются при проектировании роботизированного комплекса ГАСК сборки электронных модулей (ЭМ) многономенклатурного производства.

Учет вероятностного характера сборки ЭМ в ГАСК выполнен применением моделей систем массового обслуживания. Рассмотрена методика проектирования и оптимизации транспортных операций с учетом вероятностного характера подачи и обслуживания заявок от автоматизированных технологических операций на транспорт и обеспечения требуемого уровня загрузки оборудования.

Optimization of transport operations carried out on the basis of their models, which are obtained when designing complex robotic assembly complex of electronic modules (EM) in multiproduct production. Account the probabilistic nature of the EM assembly in FAAC was made using models of queuing systems. The method of design and optimization of transport operations had also been covered. Computer-aided design of optimal transport operations was made in consideration of the probabilistic nature of the supply and maintenance of applications received from ATO for transport and the required level of equipment utilization.

Ключевые слова: транспортная операция, система массового обслуживания, оптимизация параметрическая, оптимизация структурная, эффективность, комплексность, синтез, надежность, производительность.

Keywords: transport operation, system service, optimization parameter, optimization structure, efficiency, complex, synthesis, reliability, productivity.

Введение

Электронные модули (ЭМ) являются основной частью электронной аппаратуры, которая широко применяется в военной технике и народном хозяйстве. Поэтому автоматизация производства ЭМ — актуальна [1—5]. Наиболее сложно автоматизировать многономенклатурное производство (из-за частой сменяемости изделий ЭМ). При автоматизации сборки ЭМ транспорт либо вовсе не применяется или применяется ленточный конвейер, работающий в тактовом режиме. Это значительно уменьшает возможности повышения эффективности комплексов. Для автоматизации многономенклатурного производства наиболее перспективна сборка ЭМ в роботизированных комплексах, например ГАСК [1, 2]. При этом проектирование ГАСК и его элементов выполняется по специальной методологии [1]. Проектирование ГАСК должно быть компьютерным, комплексным, многовариантным; на основе оптимальных технологических, транспортных операций, оптимальных структур, с учетом компоновки оборудования. Для этого нужны методы проектирования (синтеза, технико-экономической оценки, оптимизации, точности, надежности, производительности, стоимости) и методики проектирования оптимальных технологических операций сборки ЭМ с учетом вероятностного характера сборки; оптималь-

ных транспортных операций, компоновки оборудования, оптимальных структур.

Для учета вероятностного характера сборки ЭМ в роботизированном комплексе, обоснованного выбора транспортного оборудования для структур ГАСК сборки ЭМ в многономенклатурном производстве, обеспечения требуемого уровня загрузки оборудования нужно разработать методику проектирования оптимальных транспортных операций, выполнить исследование влияния типа оборудования и годовой программы выпуска на эффективность сборки. Без этой методики невозможна эффективная сборка ЭМ в ГАСК.

Проектирование происходит в три этапа [1]. На первом этапе разрабатываются оптимальные технологические операции (АТОп) сборки ЭМ в ГАСК из однотипных электронных компонентов (ЭК). На втором этапе происходит проектирование техпроцессов сборки ЭМ из однотипных ЭК для оптимальных подструктур. На третьем этапе разрабатываются оптимальные операции сборки ЭМ из разнотипных ЭК, оптимальные транспортные операции (АТрОп), компоновка оборудования и на их основе — оптимальные структуры ГАСК. Предлагаемая методика применяется в третьем подэтапе третьего этапа проектирования ГАСК.

Основные допущения, принятые в методике проектирования оптимальных транспортных операций с использованием моделей систем массового обслуживания (СМО): модель производства ГАСК представлена в виде случайного процесса подачи заявок на обслуживание от групп взаимозаменяемых технологических автоматов и описана в рамках СМО, которая выбрана с ожиданием, замкнутой, многоканальной. В СМО с ожиданием поступившая заявка от АТОп не покидает систему, а становится в очередь на обслуживание. В замкнутой СМО число обслуживаемых приборов ограничено числом единиц АТОп — m; в многоканальной СМО число каналов определяется числом единиц транспортного оборудования — n.

Процесс подачи заявок на обслуживание АТОп — Марковский случайный с непрерывным временем (вероятность подачи заявки АТОп на обслуживание в момент времени $t > t_0$ не зависит от того, как проходил процесс в ГАСК до времени t_0 и переход ГАСК из одного состояния в другое возможен в любой момент времени t). Потоки событий, переводящие ГАСК из одного состояния в другое, — пуассоновские (интенсивность заявок на обслуживание АТОп $\lambda = 1/T_ц$, где $T_ц$ — среднее цикловое время сборки партии изделий ЭМ или подготовки партии компонентов ЭК), ординарные, постоянные (λ = const при равномерной интенсивности поступления заявок от одной АТОп в рассматриваемом интервале времени), без последействия (в одно и то же время может быть подана и обработана одна заявка). Интервал времени между двумя соседними событиями распределен по показательному закону.

Методика проектирования с учетом вероятностного характера подачи и обслуживания заявок на транспорт позволяет для каждого типа изделия не только создать (синтезировать) индивидуальные АТрОп, оптимизировать выбор марки транспортного оборудования и его количества $T^{тр}_{gq\,опт}$, но и обеспечивает требуемую загрузку технологического (АТО) $K_{зАТО}$ и транспортного (АТрО) $K_{зАТр}$ оборудования конкретной структуры ГАСК R_g.

Постановка задачи проектирования, методы, критерии

Необходимо спроектировать оптимальную транспортную операцию с выбором оптимальной марки и минимального количества транспортного оборудования за счет максимального значения аргумента. Аргументом является комплексный показатель эффективности транспортной операции с учетом ограничений:

$$\left(\tilde{P}^{тр}_{gq\,опт}, T^{тр}_{gq\,опт}, n^{тр}_{gq\,опт}\right) = \\ = \arg\max\left[P_{оп}\left(\tilde{P}^{тр}_{gqv}, T^{тр}_{gqv}, n^{тр}_{gq}\right)\right]; \\ n^{тр}_{gq\,опт} = \min\left(n^{тр}_{gq} = 1,\ 2,\ \ldots\right)$$

при ограничениях на:

загрузку АТО (не ниже допустимого уровня)

$$K_{з\,АТО}\left(\tilde{P}^{тр}_{gq\,опт}, T^{тр}_{gq\,опт}, n^{тр}_{gq}\right) \geqslant K_{з\,АТО\,треб}$$

при $n^{тр}_{gq} = n^{тр}_{gq\,опт}$;

загрузку АТрО (не выше допустимого уровня)

$$K_{\text{з АТрО}}\left(\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq\ \text{опт}}, T^{\text{тр}}_{gq\ \text{опт}}, n^{\text{тр}}_{gq}\right) \leqslant K_{\text{з АТрО треб}}$$

при $n^{\text{тр}}_{gq} = n^{\text{тр}}_{gq\ \text{опт}}$;

суммарные транспортные затраты

$$\begin{cases} C_{\text{тр}}\left(\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq\ \text{опт}}, T^{\text{тр}}_{gq\ \text{опт}}, n^{\text{тр}}_{gq}\right) \leqslant \left[C_{\text{тр}}\right]; \\ K_{\text{тр}}\left(\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq\ \text{опт}}, T^{\text{тр}}_{gq\ \text{опт}}, n^{\text{тр}}_{gq}\right) \leqslant \left[K_{\text{тр}}\right] \\ \text{при } n^{\text{тр}}_{gq} = n^{\text{тр}}_{gq\ \text{опт}}. \end{cases}$$

Проектирование оптимальных транспортных операций носит комплексный характер [1]. Применены методы синтеза, технико-экономической оценки; определения и обеспечения точности, надежности, производительности, стоимости. В качестве метода оптимизации выбран метод полного перебора; критерий — комплексный показатель эффективности транспортных операций; ограничения — загрузка оборудования и затраты на транспортные операции.

Синтез множества транспортных операций, СМО

Упрощенно синтез множества транспортных операций с использованием СМО (в составе данной структуры ГАСК) можно представить как выполнение комплекса действий: формирование множества шаблонов СМО и их перебор; определение признаков начальной модели СМО (по шаблону) и множества шаблонов АТрОп; перебор технологических операций; формирование множества шаблонов транспортных операций, обслуживающих технологическую операцию и их перебор; определение (по шаблону) признаков и модели транспортной операции; формирование множества шаблонов видов возможных технологических операций (выполняемых до обслуживаемой) и его перебор; поиск места, откуда перевозится груз (перебор операции в составе техпроцесса); определение признаков модели АТрОп (перевозимые компоненты; операции, связанные с обслуживаемой и предшествующие ей; объем транспортной партии; время непрерывной работы единицы АТО без загрузки по данному транспортному оборудованию; интенсивность потока заявок от группы АТО по данному транспорту); назначение на СМО модели транспортной операции; определение признаков модели СМО (интенсивности потока заявок, среднего пути единицы АТрО при обслуживании одной заявки и от группы АТО); назначение на множество транспортных операций (в составе СМО) множества транспортного оборудования; выполнение цикла по каналам обслуживания (по АТрО) $n^{\text{тр}}_{gq} = 1, 2\ldots$ (на каждом шаге число АТрО увеличивается на 1); перебор множества оборудования АТрО (выбор на каждом шаге очередной марки АТрО); определение признаков модели СМО (среднее время обслуживания одной заявки для единицы груза; расчет трудоемкости и производственных затрат; формирование множества транспортного оборудования — кандидатов для выполнения транспортных операций; для суммарного груза, перевозимого единицей АТрО (ходка); расчет признаков — трудоемкости, площади, производительности, затрат.

По производственным затратам — сравнение с допустимыми значениями $[C_{\Sigma\text{тр}}]$ $[K_{\Sigma\text{тр}}]$, отсев вариантов, не прошедших тест; определение признаков модели СМО (ρ — характеристический параметр СМО; $p_{\text{о}}$ — вероятность, что все транспортное оборудование АТрО свободно от обслуживания); проверка наличия установившегося режима в СМО ($\rho < 1$); сравнение моделей СМО и выбор (на данном уровне) лучшего варианта модели СМО (по комплексному показателю $P_{\text{оптр}}$ с учетом ограничений); расчет вероятностных характеристик модели СМО (вероятности того, что все АТрО свободны; среднего числа свободных АТрО; среднего числа заявок, находящихся в очереди и в обслуживании; коэффициентов простоя технологического и транспортного оборудования, коэффициентов занятости $K_{\text{зАТО}}$ и $K_{\text{зАТрО}}$). Проверка обеспечения загрузки оборудования АТО $K_{\text{зАТО}} \geqslant K_{\text{зАТО треб}}$ (не ниже допустимого уровня) и АТрО $K_{\text{зАТрО}} \leqslant K_{\text{зАТрО треб}}$ (не выше допустимого уровня). Уточнение количества транспортного оборудования с учетом занятости оборудования и образование полной модели СМО.

Компьютерное проектирование оптимальных транспортных операций может быть выполнено, например, с помощью специального алгоритма.

Алгоритм содержит 40 блоков (рис. 1). В блоке 1 происходит формирование множества шаблонов СМО $\overline{\tilde{P}}_g^{\text{тр}}$, входящих в состав шаблона данного варианта структуры ГАСК $\overline{R}_g$. В блоке 2 выполняется цикл по всем шаблонам СМО $\overline{\tilde{P}}_{gq}^{\text{тр}}$, входящим во множество $\overline{\tilde{P}}_g^{\text{тр}}$ (индекс перебора шаблонов СМО — q); в блоке 3 — формирование признаков (на ос-

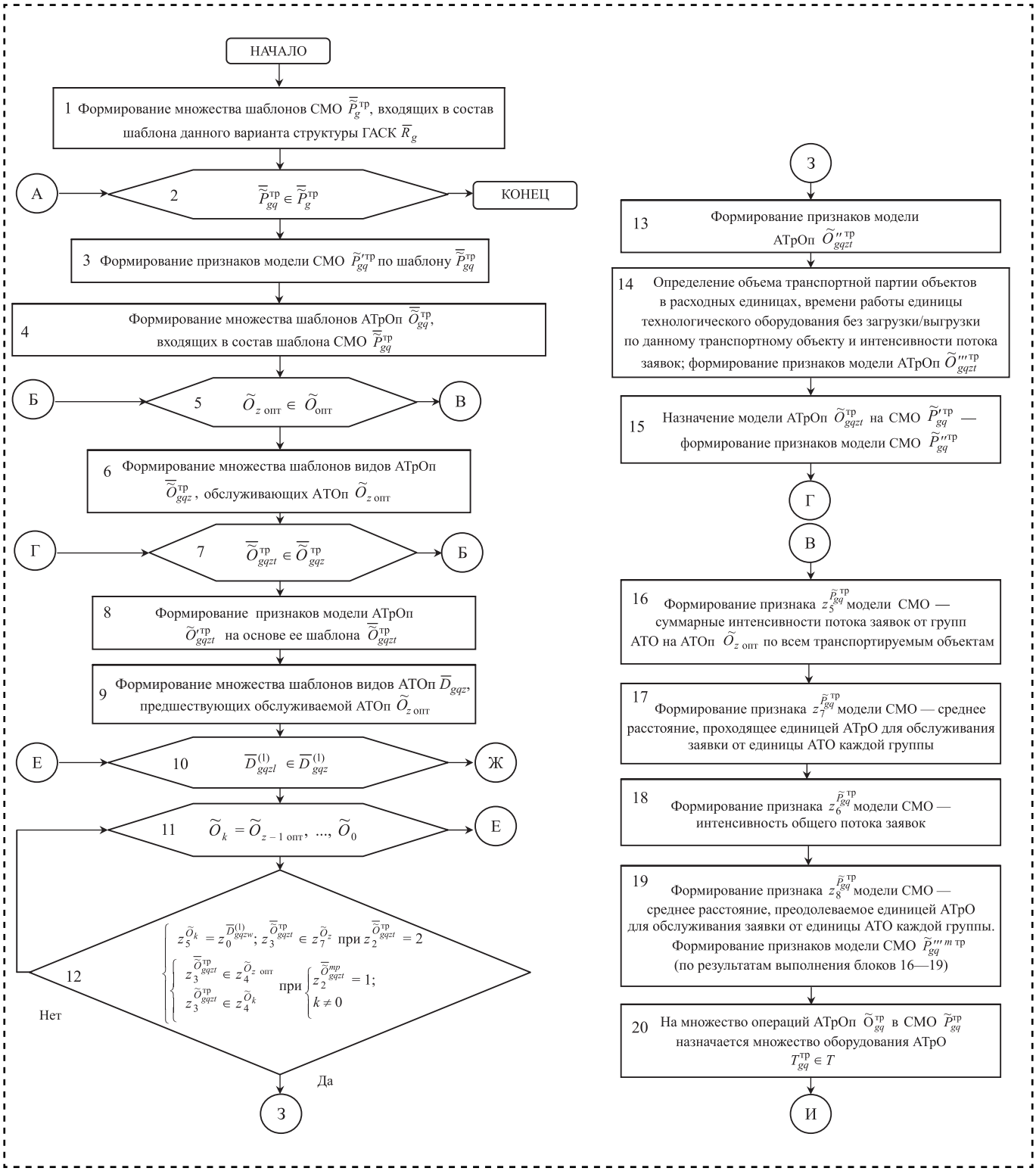
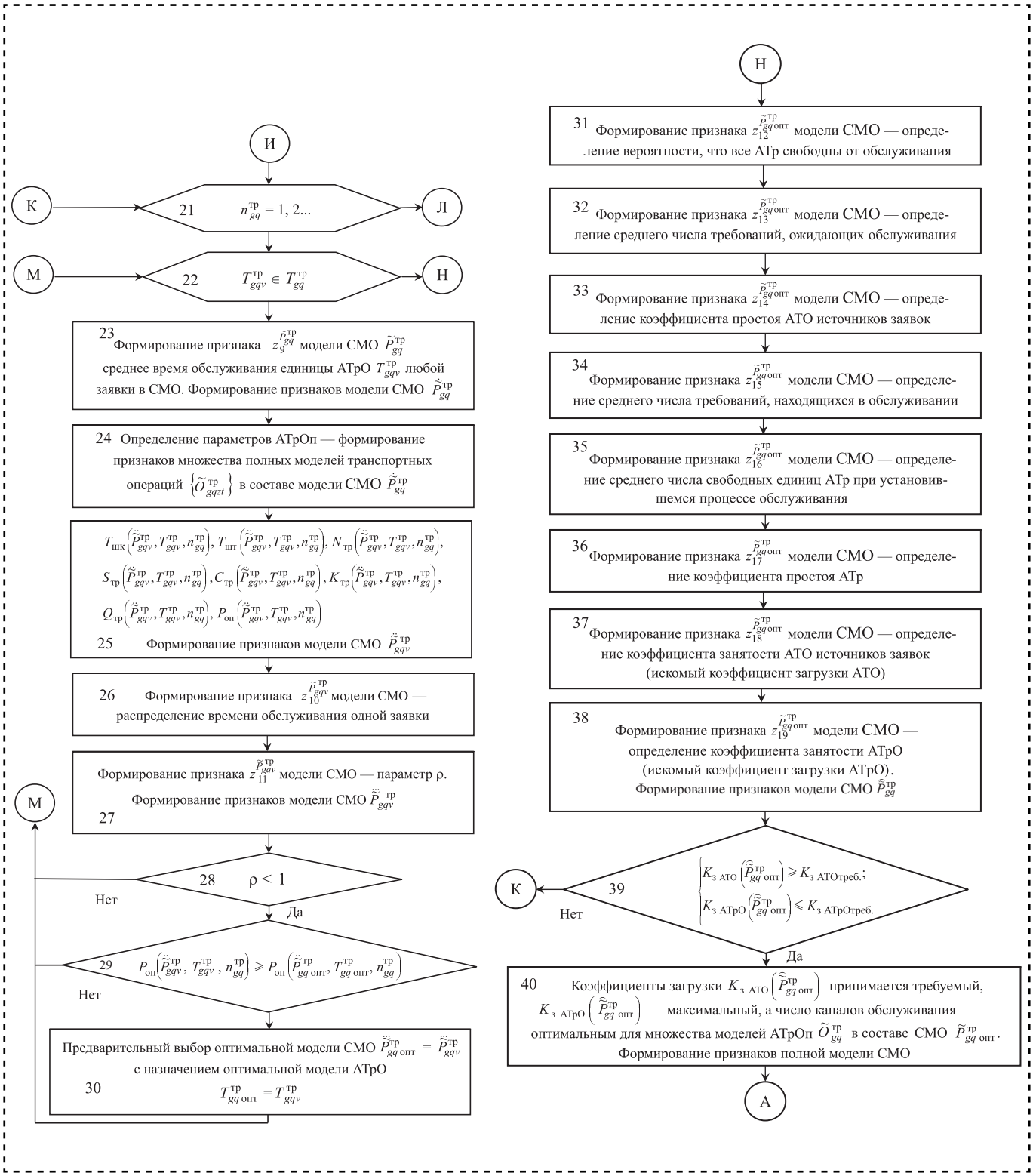


Рис. 1. Алгоритм проектирования оптимальных

нове шаблона $\bar{\tilde{P}}_{gq}^{\text{тр}}$) и предварительной модели СМО $\tilde{P}'^{\text{тр}}_{gq}$; в блоке 4 — формирование множества шаблонов транспортных операций $\bar{\tilde{O}}_{gq}^{\text{тр}}$, входящих в состав шаблона СМО $\bar{\tilde{P}}_{gq}^{\text{тр}}$; в блоке 5 — цикл по всем операциям $\tilde{O}_{z\,\text{опт}}$ в составе модели данного варианта структуры R_g (индекс перебора операций — z). В блоке 6 — формирование множества шаблонов транспортных операций



транспортных операций

$\bar{\tilde{O}}^{\text{тр}}_{gqz} \subset \bar{\tilde{O}}^{\text{тр}}_{gq}$, обслуживающих технологическую операцию $\tilde{O}_{z\,\text{опт}}$; в блоке 7 — цикл по всем шаблонам транспортных операций $\bar{\tilde{O}}^{\text{тр}}_{gqzt}$, входящим во множество $\bar{\tilde{O}}^{\text{тр}}_{gqz}$ (индекс перебора шаблонов транспортных операций — t); в блоке 8 — формирование признаков модели транспортной операции $\tilde{O}'^{\text{тр}}_{gqzt}$ на основе ее шаблона $\bar{\tilde{O}}^{\text{тр}}_{gqzt}$ и предварительной модели транспортной операции $\tilde{O}'^{\text{тр}}_{gqzt}$; в блоке 9 — формирование множества шаблонов видов возможных технологических операций $\bar{D}_{gqz}$, выполняемых до обслуживаемой операции $\tilde{O}_{z\,\text{опт}}$. В блоках 10 и 11 выполняются цикл по всем шаблонам видов технологических операций $\bar{D}_{gqzl}$, входящих во множество $\bar{D}_{gqz}$ (индекс перебора шаблонов транспортных операций — l) и цикл с обратным перебором технологических операций в составе техпроцесса сборки ЭМ от операции $\tilde{O}_{z-1\,\text{опт}}$ до $\tilde{O}_0$ (индекс перебора шаблонов операций — $k = z - 1...0$). В блоке 12 проверяются условия совпадения (равенства) идентификаторов шаблонов (ИШ) вида технологической операции и $\bar{D}_{gqzl}$ $\left(z_5^{\tilde{O}_k} = z_0^{\bar{D}_{gqzl}}\right)$. В блоке 13 формируются признаки с индексами 3 и 4 и промежуточная модель АТрОп $\tilde{O}''^{\text{тр}}_{gqzt}$. В блоке 14 определяются признаки: $z_5^{\tilde{O}^{\text{тр}}_{gqzt}}$ (объем транспортной партии), $z_6^{\tilde{O}^{\text{тр}}_{gqzt}}$ (время непрерывной работы единицы технологического оборудования без необходимости загрузки/выгрузки по данному транспортному объекту), $z_7^{\tilde{O}^{\text{тр}}_{gqzt}}$ (соответствующая интенсивность потока заявок) и промежуточная модель операции АТрОп $\tilde{O}'''^{\text{тр}}_{gqzt}$. В блоке 15 происходит назначение транспортной операции $z_{13}^{\tilde{O}^{\text{тр}}_{gqzt}}$ на СМО $\tilde{P}'^{\text{тр}}_{gq}$ (дополнение признака $z_4^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ модели СМО $\tilde{P}'^{\text{тр}}_{gq}$ ИШ транспортной операции $\tilde{O}^{\text{тр}}_{gqzt}$, обслуживающей технологическую операцию $\tilde{O}_z$; полностью признак $z_4^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ и вместе с ним модель СМО $\tilde{P}''^{\text{тр}}_{gq}$ формируются в результате выполнения всех шагов цикла (блоки 5—15); конец шага цикла по шаблонам транспортных операций $\bar{\tilde{O}}^{\text{тр}}_{gqzt}$). В блоках 16—19 формируются признаки ($z_5^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ — суммарные интенсивности потока заявок от групп АТО на операциях $\tilde{O}_z$ по всем транспортируемым объектам; $z_7^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ — среднее расстояние, которое необходимо преодолеть единице транспорта АТрО для обслуживания заявки от единицы АТО каждой группы; $z_6^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ — интенсивность общего потока заявок; $z_8^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ — средний путь единицы АТрО при обслуживании любой заявки в СМО) и промежуточная модель СМО $\tilde{P}'''^{\text{тр}}_{gq}$. В блоке 20 на множество транспортных операций $\tilde{O}^{\text{тр}}_{gq}$ в составе СМО $\tilde{P}'''^{\text{тр}}_{gq}$ назначается множество марок транспортного оборудования $T^{\text{тр}}_{gq} \in T^{\text{тр}}$ по условию равенства идентификаторов шаблонов вида обслуживающего АТрО $z_1^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ в составе шаблона СМО $\bar{\tilde{P}}^{\text{тр}}_{gq}$ и ИШ вида АТрО $z_1^{T^{\text{тр}}_{gqv}}$.

В блоках 21 и 22 выполняются цикл по числу каналов обслуживания ($n^{\text{тр}}_{gq} = 1, 2\ldots$, на каждом шаге число каналов обслуживания увеличивается на 1) и цикл по всем единицам АТрО из сформированного множества $T^{\text{тр}}_{gq}$ (на каждом шаге выбирается очередная единица $T^{\text{тр}}_{gqv} \in T^{\text{тр}}_{gq}$; индекс перебора единиц АТрО — v). Блок 23 служит для формирования признака $z_9^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ (среднее время обслуживания единицей АТрО $T^{\text{тр}}_{gqv}$ любой заявки в СМО) и промежуточной модели СМО $\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}$. В блоке 24 определяются признаки (множество штучно-калькуляционных времен; среднее штучно-калькуляционное время; штучное время; подготовительно-заключительное время для АТрО; переменные и постоянные годовые транспортные затраты по каждой операции АТрОп; множества моделей транспортных операций $\left\{\tilde{O}^{\text{тр}}_{gqzt}\right\}$) и полная модель операции АТрОп $\tilde{O}^{\text{тр}}_{gqzt}$. В блоке 25 проводится расчет параметров СМО $\tilde{\tilde{P}}^{\text{тр}}_{gq}$ (формирование признаков СМО с индексами 20—25: среднее суммарное штучно-калькуляционное время АТрОп; суммарное штучное время АТрОп; площадь, занимаемая транспортной магистралью; переменные и постоянные годовые затраты по АТрОп; годовая производительность АТрОп; значение обобщенного показателя эффективности АТрОп). В блоках 26 и 27 определяются признаки $z_{10}^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ (распределение времени обслуживания одной заявки), $z_{11}^{\tilde{P}^{\text{тр}}_{gq}}$ (параметр ρ) и формируется промежуточная модель СМО $\tilde{\tilde{P}}^{\text{тр}}_{gq}$. В блоке 28 осуществляется проверка наличия установившегося режима обслуживания в СМО ($\rho < 1$; если

условие выполнено, переход к блоку 29, в противном случае — данная модель АТрО $T_{gqv}^{\text{тр}}$ не обеспечивает установившийся режим для СМО $\tilde{\dot{P}}_{gq}^{\text{тр}}$ — более на данном шаге не рассматривается; выполняется следующий шаг цикла по всем единицам АТрО $T_{gq}^{\text{тр}}$ — переход к блоку 22). В блоке 29 проводится сравнение вычисленного значения показателя $P_{\text{оп}}\left(\dot{\tilde{P}}_{gq}^{\text{тр}}, T_{gqv}^{\text{тр}}, n_{gq}^{\text{тр}}\right)$ с максимальным значением других вариантов. В блоке 30 происходит выбор для операции АТрОп марки оборудования АТрО (если полученное значение показателя $P_{\text{оп}}$ больше максимального, то модель марки АТрО $T_{gq\ \text{опт}}^{\text{тр}} = T_{gqv}^{\text{тр}}$ принимается за оптимальную для множества транспортных операций $\tilde{O}_{gq}^{\text{тр}}$ в составе СМО $\tilde{\dot{P}}_{gq}^{\text{тр}}\left(\dot{\tilde{P}}_{gq}^{\text{тр}}\right)$ на данном шаге цикла. Затем — конец шага цикла по маркам АТрО $T_{gqv}^{\text{тр}} \in T_{gq}^{\text{тр}}$). В результате выполнения цикла по блокам 22—30 определяются признаки модели СМО $\dddot{\tilde{P}}_{gq}^{\text{тр}}$. В блоках 31—38 рассчитываются вероятностные характеристики модели СМО: вероятность того, что все приборы свободны от обслуживания p_0; среднее число требований, ожидающих начала обслуживания $M_{\text{ож}}$; коэффициент простоя требований, ожидающих обслуживания $K_{\text{пт}}$; среднее число требований, находящихся в системе обслуживания M; среднее число свободных приборов при установившемся процессе обслуживания N_0; коэффициент простоя приборов обслуживания $K_{\text{пп}}$; коэффициент занятости обслуживаемых приборов (коэффициент загрузки АТО) $K_{\text{зАТрО}}$; коэффициент занятости каналов обслуживания (коэффициент загрузки АТрО) $K_{\text{зАТрО}}$. В результате расчета вероятностных характеристик СМО формируются признаки и промежуточная модель СМО $\hat{\tilde{P}}_{gq}^{\text{тр}}$. Модель $\hat{\tilde{P}}_{gq}^{\text{тр}}$ получается при объединении ее признаков с индексами 0, 1, 2, 4—11, 20—26 и признаков с индексами 12—19, определенных в результате проектирования. В блоке 39 происходит учет ограничений на загрузку технологического АТО и транспортного АТрО оборудования. Блок 40 является последним в алгоритме компьютерного проектирования транспортных операций. В нем уточняется требуемое для операции количество оборудования АТрО, формируется полная модель СМО. Модель оптимальной транспортной операции

$$\tilde{P}_{gq\ \text{опт}}^{\text{тр}} = \hat{\tilde{P}}_{gq\ \text{опт}}^{\text{тр}} \times$$

$$\times \bigcup_{k=3} \left\{ z_k^{\tilde{P}_{gq\ \text{опт}}^{\text{тр}}} \middle| z_3^{\tilde{P}_{gq\ \text{опт}}^{\text{тр}}} = n_{gq\ \text{опт}}^{\text{тр}} = \min\left(n_{gq}^{\text{тр}} = 1, 2, \ldots\right) \right\}$$

получается на основе шаблонов, модели СМО и признаков $z_{0\ldots27}^{\tilde{P}_{gq}^{\text{тр}}}$, $z_{0\ldots13}^{\tilde{P}_{gq\ \text{опт}}^{\text{тр}}}$. На этом проектирование транспортных операций заканчивается.

Исследования влияния вариантов транспортных операций на эффективность структур показали, что учет вероятностного характера транспортных потоков в методике синтеза транспортных операций позволил уточнить величину переменных затрат на транспортные операции ГАСК, которые оказались соизмеримыми с переменными затратами на технологические операции (вместо широко применяемых при укрупненных расчетах 0,2 $C_{\text{ГОП}}$; постоянные транспортные затраты получились близкими к обычно принимаемым $0{,}2K_{\text{ГОП}}$).

Результаты исследований

Исследования проводили с помощью программы проектирования структур ГАСК "Контур"для структур ГАСК сборки ЭМ состава: 20 интегральных микросхем во втором корпусе (ИС_2), 20 интегральных микросхем в четвертом корпусе с планарными выводами ИС_4, 20 ЭРЭ, 3 микросхемы во втором корпусе неширокого применения $\text{ИС}_{2\text{ншпр}}$, 2 $\text{ИС}_{4\text{ншпр}}$.

Рассмотрены 8 конкурирующих вариантов компоновок ГАСК, отдельные фрагменты которых могут смешиваться между собой, образуя различные комбинации. Эффективность вариантов оценивалась с помощью обобщенного показателя эффективности структур ГАСК P_{k2} для многономенклатурного производства.

Условия сборки: номенклатура ЭМ N_a = = 100 видов/год, программа выпуска ЭМ $N_{\text{ЭМ}}$ = 1000 шт./год.

По двум лучшим вариантам рассчитано количество транспортного оборудования АТрО различных видов и их коэффициенты загрузки при номенклатуре N_a = 100 видов/год и изменении годовой программы $N_{\text{ЭМ}}$, постоянные и переменные транспортные затраты.

В результате анализа значений показателя P_{k2} оптимальным вариантом компоновки ГАСК следует признать вариант с транспортной самоходной тележкой (СТ) и подвесным обслуживающим транспортным роботом (ПТр). Применение ПТр позволило уменьшить переменные транспортные затраты примерно на 15 %, а постоянные — более чем на 50 % в сравнении с вариантами, использующими в качестве АТрО только СТ. Сравнивая суммарные тех-

нологические и транспортные затраты, можно сделать вывод, что переменные транспортные затраты в ГАСК сравнимы по своей величине с технологическими, а в отдельных вариантах превосходят их почти на 35 %. Вследствие этого вклад транспортных затрат в суммарные затраты для ГАСК представляется значительным.

Результаты исследований свидетельствуют, что загрузка АТО практически во всем диапазоне изменения $N_{ЭМ}$ поддерживается на запланированном уровне (93...99 %). При этом вариант с использованием СТ и напольных обслуживающих роботов загрузки/выгрузки обеспечивает несколько большую (на 2...5 %) загрузку АТО. Однако его конкурент позволяет устранить имеющуюся недозагрузку АТрО, подняв ее для СТ в 1,5...2 раза, не приближая к предельному значению (0,85).

Принимая во внимание отсутствие в данном варианте структуры ГАСК обслуживающих напольных роботов и, соответственно, связанных с ними затрат, а также одинаковое суммарное число единиц требуемого транспортного оборудования в рассматриваемых вариантах при $N_{ЭМ}$ = 10...500 шт./год, подтвердило вывод о предпочтительности варианта с СТ.

Оптимальным для ГАСК многономенклатурного производства ЭМ следует признать вариант компоновки с использованием самоходной тележки и подвесного транспортного робота. Такое решение позволяет существенно сократить суммарные затраты на внедрение и эксплуатацию ГАСК, а также поддержать загрузку АТО и АТрО на необходимо высоком уровне в широком диапазоне программ выпуска ЭМ (рис. 2).

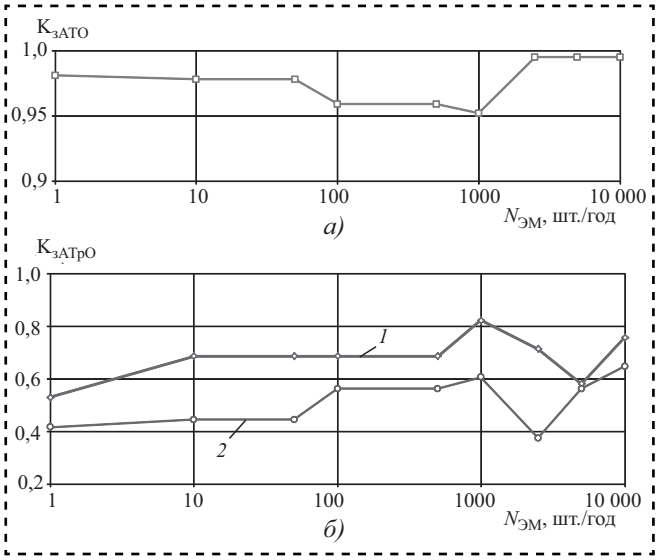


Рис. 2. Исследование зависимости загрузки технологического и транспортного оборудования от программы выпуска: *а* — АТО; *б* — *1* — ПТр; *2* — СТ

Выводы

Предложены:

- методика компьютерного проектирования оптимальных транспортных операций сборки изделий ЭМ из разнотипных компонентов в многономенклатурном производстве (методика учитывает вероятностный характер сборки изделий ЭМ, обеспечивает не только работоспособность сложной транспортно-накопительной системы, но и требуемую загрузку технологического и транспортного оборудования);
- модели оптимальных транспортных операций сборки изделий ЭМ из разнотипных компонентов в многономенклатурном производстве;
- алгоритм компьютерного проектирования оптимальных транспортных операций сборки изделий ЭМ из разнотипных компонентов в многономенклатурном производстве.
- методика АТрОп позволила спроектировать транспортные операции на основе моделей СМО с оптимизацией выбора марок и числа единиц оборудования АТрО при учете требуемой загрузки оборудования и допустимых затрат. Она позволила более точно определить затраты на транспортные операции. Затраты на транспортные операции АТрОп, особенно переменные $C_{тр}$, оказались значительно больше величины $C_{тр} = 0{,}2C_{ГОП}$, обычно принимаемой при приближенных расчетах. Затраты $C_{тр}$ соизмеримы с технологическими затратами, поэтому их необходимо считать и учитывать.

Библиографический список

1. **Иванов Ю.В.** Автоматизация производства электронной аппаратуры М.: Бином, 2015. 535 с.

2. **Иванов Ю.В., Лакота Н.А.** Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов: учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.

3. **Мэнгин Ч.Г., Макклелланд.** Технология поверхностного монтажа: пер. с англ. / под ред. Л.А. Коледова. М.: Мир, 1990. 276 с.

4. **База данных** для САПР структур ГАСК сборки ЭМ 1-го уровня: свидетельство ФС интеллектуальной собственности / Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. № 2006620158. 2.06.2006.

5. **Модуль** автоматической компоновки оборудования и проектирования транспортных операций: свидетельство ФС интеллектуальной собственности / Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. № 2006611923. 2.06.2006.

УДК 681.5.08

А.А. Плешаков, М.Г. Кристаль, *д-р техн. наук*
(Волгоградский государственный технический университет)
E-mail: akrense@yandex.ru

Экспериментальное исследование пневмоэлектронного измерительного устройства для автоматической сортировки деталей перед селективной сборкой*

Приведены результаты экспериментальной оценки влияния конструктивных и рабочих параметров нового пневмоэлектронного измерительного устройства на погрешность бесконтактного измерения диаметров цилиндрических деталей с использованием преобразования искомого размера во временной интервал истечения сжатого воздуха из измерительной камеры в атмосферу через зазор, образованный поверхностью детали, расположенной в базирующей призме, и срезом измерительного сопла, лежащим в ее боковой поверхности. Установлено, что погрешность устройства не превышает ±0,27 мкм в измерительном диапазоне 6...6,22 мм и ±0,45 мкм в диапазоне 10...10,22 мм. Устройство может быть использовано для сортировки твердосплавных зубков перед селективной сборкой буровых коронок.

Given paper covers the results of the experimental evaluation of the effect of design and operational parameters on the accuracy of a new pneumo-electronic gauge for a non-contact measurement of cylindrical parts' diameters, which performs a temporal conversion of the target diameter into time interval, during which the measurement chamber containing the compressed air discharges into the atmosphere through the gap formed by the surface of the target part, located in the channel of a V-block, and the measuring nozzle exit section, contained by one of the channel's faces. The established measurement error of the gauge is ±0,27 μm in the measuring range of 6...6,22 mm and ±0,45 μm in the range of 10...10,22 mm. The gauge may be used for sorting of cylindrical TCI inserts prior to drilling bits selective assembly.

Ключевые слова: измерение линейных размеров, измерение диаметров, пневматические методы измерения, временное преобразование.

Keywords: displacement measurement, external diameter measurement, pneumatic gauging, temporal conversion.

Для обеспечения точности сборки буровой коронки типа КНШ применяют метод групповой взаимозаменяемости. В отверстия корпуса коронки запрессовывают цилиндрические твердосплавные зубки с номинальным значением диаметров 6...10 мм, которые, согласно применяемой технологии, сортируют по диаметру на 44 размерные группы с групповым допуском 5 мкм (общий допуск на диаметр зубка составляет 220 мкм). Допускаемая погрешность δ измерения линейных размеров в диапазоне 6...10 мм с допуском 5 мкм составляет 1,4 мкм [1]. Объем выпуска и широкая номенклатура типоразмеров буровых коронок обусловливают необходимость разработки автоматических средств измерения диаметров цилиндрических деталей, обеспечивающих требуемую точность в цеховых условиях. Для этого целесообразно применение пневматических средств измерения линейных размеров, нечувствительных к вибрационным и ударным воздействиям, электромагнитным полям и запыленности воздуха [2]. Дополнительным преимуществом пневматического метода является возможность бесконтактного измерения.

* Работа выполнена в рамках гранта № 35/762-15 для молодых ученых Волгоградского государственного технического университета.

Пневматические измерительные устройства [3] ротаметрического и манометрического типов обеспечивают необходимую точность измерения при изменении зазора между поверхностью измеряемой детали и торцом измерительного сопла в диапазоне шириной менее 200 мкм. При бесконтактном пневматическом методе измерения наружного диаметра используют измерительные кольца [4] со встроенными во внутреннюю поверхность соплами. Обеспечение погрешности измерения по этому методу в пределах 1,4 мкм возможно лишь в диапазоне до 76 мкм.

Для автоматического бесконтактного измерения диаметров D цилиндрических деталей предложено пневмоэлектронное измерительное устройство (рис. 1), осуществляющее *временное преобразование* ($D \rightarrow t_{изм}$) [5] измеряемого диаметра D в интервал времени $t_{изм}$ истечения сжатого воздуха из измерительной камеры в атмосферу через зазор, образованный поверхностью детали, установленной в базирующей призме, и срезом измерительного сопла, лежащим в ее боковой поверхности.

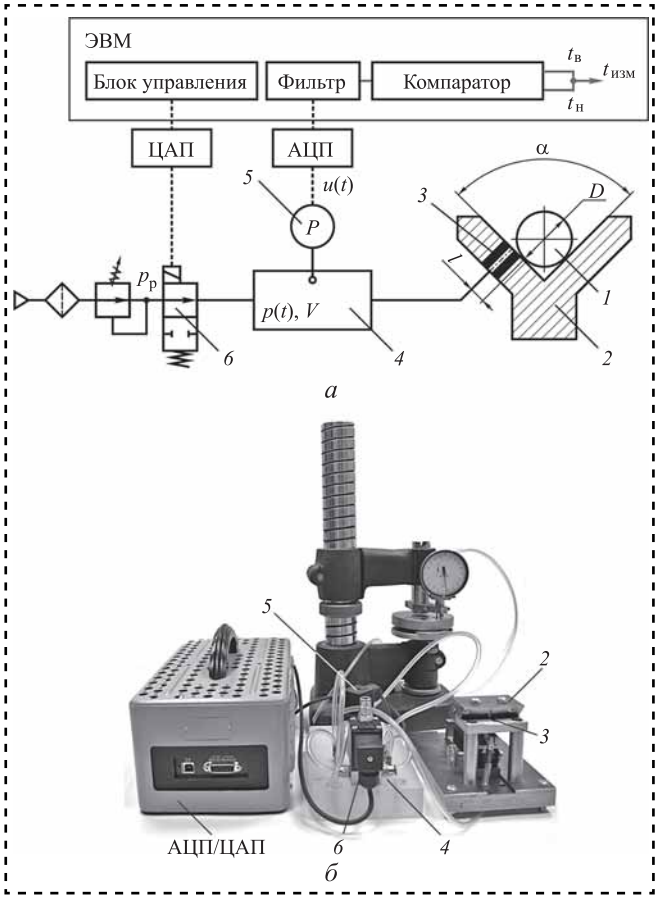


Рис. 1. Схема (*а*) и опытный образец (*б*) пневмоэлектронного измерительного устройства

Конструкция измерительного устройства

Измеряемую деталь *1* диаметром D располагают в базирующей призме *2*, в плоскости одной из поверхностей которой на смещении l от линии касания этой поверхности с поверхностью детали *1* лежит срез измерительного сопла *3* с цилиндрическим выходным каналом диаметром d, соединенного с измерительной камерой (ИК) *4* объемом V, которая соединена с камерой преобразователя *5* давления $p(t)$ сжатого воздуха в напряжение $u(t)$ и со стабилизированным источником сжатого воздуха через канал электропневматического распределителя *6*. Сигнал $u(t)$ поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и далее на ЭВМ с программным обеспечением [6], которая через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) подает сигналы управления электропневматическим распределителем *6*. Для исследования характеристик устройства разработан и изготовлен опытный образец (рис. 1, *б*).

Устройство работает следующим образом. В начальный момент времени канал электропневматического распределителя *6* открыт, и по нему сжатый воздух с рабочим давлением $p_р$ от источника поступает в ИК *4* и истекает в атмосферу через измерительный зазор между поверхностью измеряемой детали *1* и торцом измерительного сопла *3*. ИК *4* функционирует как проточная камера с входным (канал распределителя *6*) и выходным (измерительный зазор) дросселями, давление $p(t)$ воздуха в ней устанавливается на уровне $p_{изм} = f(D)$. Величина давления $p(t)$ непрерывно преобразуется в величину напряжения $u(t)$ преобразователем давления *5* (рис. 2). В момент времени $t_0 = 0$ с ЭВМ подает сигнал переключения на электропневматический распределитель *6* и начинает запись сигнала $u(t)$. Канал распределителя *6* закрывается в некоторый момент времени t_1, что приводит к прекращению поступления в ИК *4* сжатого воздуха. Далее ИК *4* функционирует как глухая камера, сжатый воздух из которой истекает в атмосферу через измерительный зазор. Давление $p(t)$ воздуха в ней

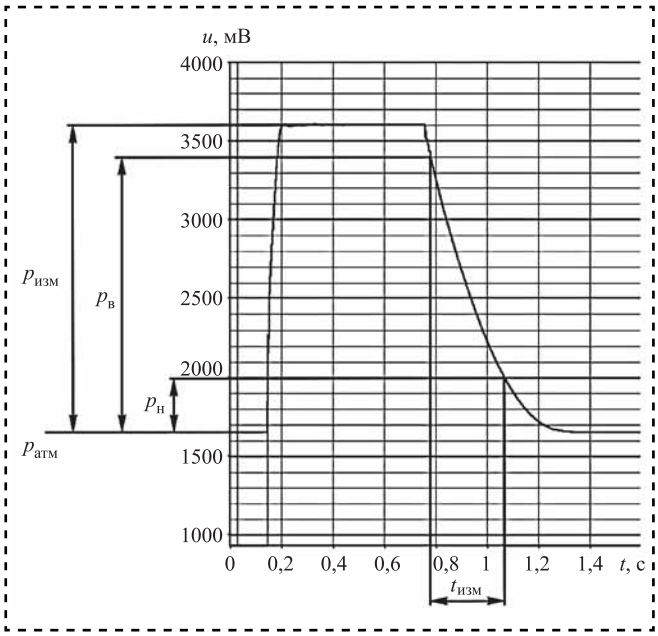


Рис. 2. Осциллограмма сигнала *u*(*t*) в процессе временнóго преобразования

уменьшается от $p(t_1) = p_{изм}$ до верхнего граничного значения $p(t_в) = p_в$, затем до нижнего граничного значения $p(t_н) = p_н$ и далее до атмосферного давления $p_{атм}$. В память ЭВМ записывается фрагмент сигнала $u(t)$, ограниченный t_0 и $t_н$, который проходит обработку фильтром низких частот для устранения высокочастотных шумов. Далее записанные значения сигнала $u(t)$ сравниваются с величинами $u_в \sim p_в$ и $u_н \sim p_н$ для установления значений $t_в$ и $t_н$. Затем вычисляется временнóй интервал $t_{изм} = t_н - t_в$. Полученное значение $t_{изм}$ позволяет оценить диаметр D измеряемой детали и преобразуется в результат $\widehat{D}$ измерения в соответствии с обратной передаточной функцией $\widehat{D} = f\left(t_{изм}\right)$. Значение $\widehat{D}$ записывается в память ЭВМ, выводится на экран и может быть использовано для управления автоматическим сортировочным устройством.

В качестве измеряемой детали *1* (см. рис. 1, *а*) использованы цилиндрические эталоны с диаметрами 6,00; 6,06; 6,10; 6,16; 6,22; 10,00; 10,06; 10,10; 10,16 и 10,22 мм. Базирующая призма *2* изготовлена в виде соединяемых основания и сменной призматической детали, что позволяет устанавливать угол α при вершине призмы из ряда 30, 45, 60 и 90°. В основании призмы имеется сквозной паз для подвода к измеряемой детали *1* одного из двух измерительных сопл *3* с диаметром *d* цилиндрического выходного канала 1 или 2 мм. Сопло *3* устанавливают в держателе механизма микроперемещений, который обеспечивает возможность задания величины смещения *l* сопла *3* в плоскости поверхности основания призмы *2* в направлении, перпендикулярном линии касания поверхностей измеряемой детали *1* и основания призмы *2*. Величина *l* устанавливается с помощью индикаторной головки (цена деления шкалы 1 мкм).

ИК *4* включает в себя канал измерительного сопла *3*, соединительные воздуховоды и камеру преобразователя давления *5*. Объем ИК *4* составляет $16{,}6 \cdot 10^{-6}$ м^3. Также изготовлена пневматическая емкость, присоединением которой объем может быть увеличен до $41{,}6 \cdot 10^{-6}$ м^3. Использованы преобразователь давления *5* WIKA модели S-10 (погрешность измерения ⩽0,25 % от измерительного диапазона 0...250 кПа) и электропневматический распределитель *6* Camozzi серии 6. В устройстве также использован блок АЦП/ЦАП модели Zet 210 (частота дискретизации 500 кГц) (см. рис. 1, *б*).

В качестве источника сжатого воздуха использована компрессорная установка ABAC GENESIS 11 500 с винтовым ротором. Для стабилизации уровня рабочего давления $p_р$ устройство оснащено блоком фильтра со стабилизатором давления ФСВ6-1/6-337.

Оценка влияния параметров устройства на погрешность измерения

Случайная составляющая $\tilde{\Delta}$ погрешности $\Delta_у$ устройства определяется как $\pm[3\sigma_t/S]$, где S — чувствительность устройства и σ_t — среднее квадратическое отклонение. Величина $\pm 3\sigma_t$ характеризует ширину интервала, к которому величина $t_{изм}$ принадлежит с вероятностью $P \approx 0{,}9973$ [7]. Для вычисления чувствительности принято выражение:

$$S = [t_{изм}(D_{мин}) - t_{изм}(D_{макс})]/[D_{макс} - D_{мин}],$$

где $D_{мин}$ и $D_{макс}$ — наименьший и наибольший диаметры измерительного диапазона.

Для оценки влияния α, l, $p_в$, $p_н$, $p_р$, d и V на погрешность $\tilde{\Delta}$ устройства выполнен ряд экспериментов, в которых эти параметры варьировались на нескольких уровнях.

Установлено, что уменьшение α приводит к повышению S и не оказывает влияния на σ_t. Следовательно, для обеспечения меньших значений $\tilde{\Delta}$ необходимо выбирать меньшие значения α. Например, при D = 6...6,22 мм уменьшение α от 90 до 30° приводит к снижению погрешности $\tilde{\Delta}$ в 2,88 раза.

Для оценки влияния l на $\tilde{\Delta}$ измерительное сопло в каждом из измерительных диапазонов D = 6...6,22 мм и D = 10...10,22 мм устанавливалось положение l = 0 так, чтобы его ось пересекала линию касания поверхностей базирующей призмы и измеряемой детали с наибольшим диаметром $D_{макс}$, путем изменения l до обеспечения максимального значения $t_{изм}$. Затем сопло смещалось в направлении увеличения диаметра D измеряемой детали от l = 0 до l = 1 мм с шагом 50 мкм. Установлено, что увеличение l до критического значения $l_{кр}$ приводит к повышению S и не оказывает влияния на σ_t. Дальнейшее увеличение l приводит к снижению S. Тогда зависимость $\tilde{\Delta} = f(l)$ имеет минимум в точке $l_{кр}$, причем $l_{кр}$ возрастает при уменьшении d и D и не зависит от α. В измерительном диапазоне D = 6...6,22 мм $l_{кр}$ = 350 мкм при d = 1 мм и $l_{кр}$ = 350 мкм $l_{кр}$ = 300 мкм при d = 2 мм. В диапазоне D = = 10...10,22 мм $l_{кр}$ = 700 мкм при d = 1 мм и $l_{кр}$ = 550 мкм при d = 2 мм.

Увеличение $p_в$ приводит к повышению S, не оказывает существенного влияния на σ_t и, следовательно, приводит к снижению погрешности $\tilde{\Delta}$. Поэтому для обеспечения наименьшей погрешности $\tilde{\Delta}$ следует назначать $p_в = 0{,}96p_{изм}(D_{мин})$, где коэффициент 0,96 введен для того, чтобы $p_в$ гарантированно не превышало наименьшего возможного давления $p_{изм}(D_{мин})$. Повышению S способствует также понижение $p_н$. Однако при этом возрастает σ_t. Установлено, что зависимость $\tilde{\Delta} = f(p_н)$ имеет минимум при $p_н$ = 11 кПа независимо от $p_в$.

С увеличением любой из величин $p_р$, d, и V возрастают как S, так и σ_t. Зависимость $\tilde{\Delta} = f(p_р)\big|_{d=\text{const},\ V=\text{const}}$ имеет минимум в точке $p_{р\,кр}$ (рис. 3), причем $p_{р\,кр}$ возрастает при уменьшении d и не зависит от V и D. Установлены значения $p_{р\,кр}$ = 125 кПа при d = 1 мм и $p_{р\,кр}$ = 87,5 кПа при d = 2 мм. Значение погрешности $\tilde{\Delta} = f(p_{р\,кр})\big|_{d=\text{const},\ V=\text{const}}$ снижается при одновременном увеличении или одновременном уменьшении d и V. При этом наименьшие значения погрешности $\tilde{\Delta} = \pm 0{,}27$ мкм и $\tilde{\Delta} = \pm 0{,}45$ мкм в соответствующих измерительных диапазонах D = 6...6,22 мм и D = 10...10,22 мм получены при d = 1 мм и $V = 16{,}6\cdot10^{-6}$ м^3, α = 30°, l = 350 мкм для D = 6...6,22 мм; α = 45°, l = 700 мкм для D = 10...10,22 мм; $p_в = 0{,}96p_{изм}(D_{макс})$; $p_н$ = 11 кПа.

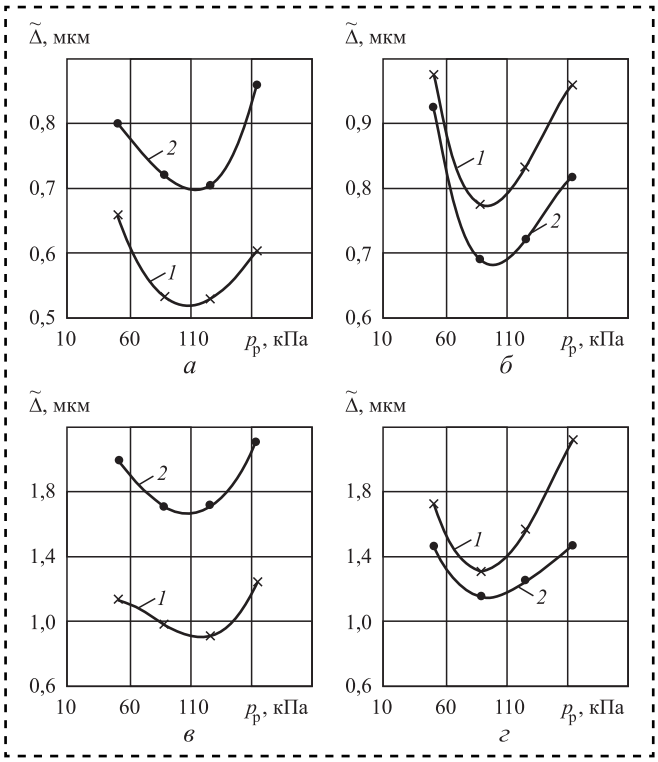


Рис. 3. Зависимость погрешности $\tilde{\Delta}$ измерения от рабочего давления $p_р$:
1 — $V = 16{,}6\cdot10^{-6}$ м^3; *2* — $V = 41{,}6\cdot10^{-6}$ м^3; *а* — D = = 6...6,22 мм, d = 1 мм; *б* — D = 6...6,22 мм, d = 2 мм; *в* — D = 10...10,22 мм, d = 1 мм; *г* — D = 10...10,22 мм, d = 2 мм

Оценка влияния температуры рабочего тела на результат измерения

На работу устройства оказывает влияние температура T рабочего тела, т.е. воздуха в ИК. Изменение T приводит к смещению результата $t_{изм}$ временнóго преобразования и, следовательно, результата измерения $\widehat{D}$. Для оценки этого влияния проведен эксперимент, в котором получены два ряда по N = 200 значений $t_{изм}$ для деталей с диаметрами D = 10 и 10,22 мм при изменении температуры T рабочего тела от 301,15 до 297,15 К. Для регистрации T использован инфракрасный пирометр

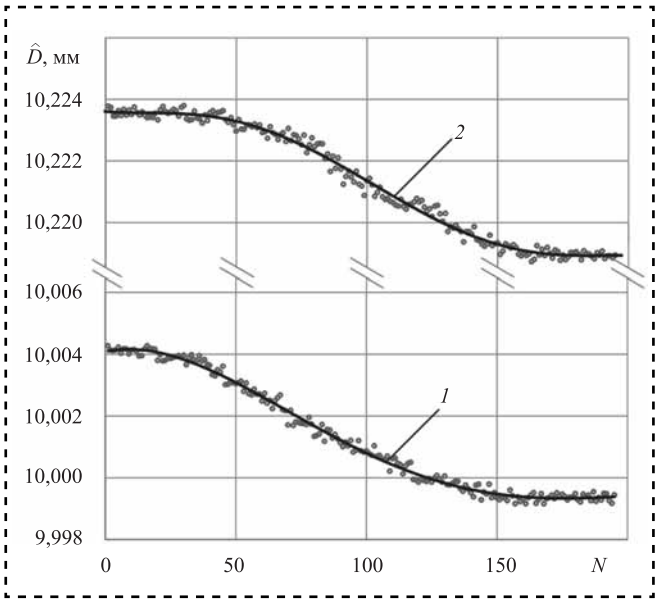


Рис. 4. Изменение результата измерения $\widehat{D}$ деталей с диаметрами D = 10 (*1*) и 10,22 мм (*2*) при изменении температуры T рабочего тела от 301,15 до 297, 15 К

АКИП-9302, луч которого направлен на зачерненный участок измерительного сопла. Уменьшение T приводит к уменьшению значения $t_{изм} = f(D)|_{D\ =\ const}$ и, следовательно, к смещению результата измерений $\widehat{D}$ в сторону меньших значений, т.е. величина T является источником систематической составляющей Δ_s погрешности $\Delta_у$ устройства. Так, снижение T на 4 К приводит к снижению $t_{изм}$ для деталей D = 10 и 10,22 мм примерно на 970 мкс. При данном сочетании параметров устройства такое смещение равносильно смещению Δ_s = 4,7 мкм результата измерений $\widehat{D}$ (рис. 4). С целью снижения погрешности устройство следует оснащать системой стабилизации температуры воздуха в ИК либо программным внесением поправки в результат измерения.

Заключение

Экспериментально установлено, что предложенное измерительное устройство обладает погрешностью, не превышающей ±0,27 мкм в диапазоне изменения диаметра измеряемой детали 6...6,22 мм и ±0,45 мкм в диапазоне 10...10,22 мм, что позволяет использовать его в цеховых условиях для селективной сборки при измерении диаметров твердосплавных зубков буровых коронок типа КНШ в составе контрольно-сортировочного автомата. Устройство может быть также использовано для измерения диаметров цилиндрических деталей в других областях машиностроения.

Библиографический список

1. **ГОСТ 8.051—81. ГСИ.** Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. Введ. 01.01.1982. М.: Изд-во стандартов, 1987. 11 с.

2. **Jermak Cz. J., Rucki M.** Air Gauging: Still Some Room for Development // AASCIT Communications. 2015. V. 2. N. 2. P. 29—34.

3. **Rucki M., Barisik B., Varga G.** Air gauges as a part of the dimensional inspection systems // Measurement. 2010. N. 43. P. 83—91.

4. **Mahr Gmbh.** Air Plugs, Air Rings, Air Snaps URL: http://www.mahr.com/en/Products/Metrology/By-Mahr-Product-Group/Millimar/Gages-and-Systems/Air-Gages/Air-Plugs,Air-Rings—Air-Snaps/ (дата обращения 03.12.2015 г.)

5. **Патент** на полезную модель **RU 154374,** МПК G 01 B 13/00. Пневмоэлектронное устройство для контроля и сортировки деталей по линейным размерам / А.А. Плешаков, А.Ю. Горелова, М.Г. Кристаль. Волгоград: ВолгГТУ 20.08.2015.

6. **Свид. о гос. регистрации** программы для ЭВМ **2014616406** Российская Федерация. Программа управления устройством для сортировки деталей на группы по линейным размерам / А.А. Плешаков, К.Т. Чан, А.Ю. Горелова, А.Д. Измайлов, М.Г. Кристаль. 2014.

7. **Douglas C. Montgomery, George C. Runger.** Applied Statistics and Probability for Engineers / John Wiley & Sons, Inc. 2014. 836 p.

УДК 628.937

С.А. Микаева, *д-р техн. наук,* **А.С. Микаева,** *канд. экон. наук,* **М.И. Бойчук**
(Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники)
E-mail: mikaeva@ npo.lit.ru

Сборка установки удаления запахов контейнерного типа

Описана сборка установки удаления запахов контейнерного типа из основных частей: блок-контейнер; ультрафиолетовый модуль; блок каталитической засыпки; шкаф управления и шкаф электронной пускорегулирующей аппаратуры. Приводятся технические характеристики и назначения основных блоков.

The article describes the assembly of the installation remove odors container type consisting of the main parts: block-container; UV-module; catalyst filling unit; control cabinet and wardrobe electronic ballasts. Technical characteristics and destination basic blocks.

Ключевые слова: установка, запахи, удаление запахов, ультрафиолетовые лампы, сборка, контейнер, шкаф управления.

Keywords: installation, odors, removal of odors, UV-lamp assembly, the container, the control cabinet.

С ростом численности населения Земли и загрязнения окружающей среды, чистый воздух и вода становится дефицитом [1—3]. Бактериологическое загрязнение питьевых вод, рек, морей и океанов, а также воздуха — несет угрозу здоровью человека и окружающей среде. Установка удаления запахов контейнерного типа предназначена для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей и для снижения в воздухе концентраций дурнопахнущих веществ (сероводород, аммиак, метан, смесь природных меркаптанов и др.), превышающих предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе населенных мест (техническая характеристика). Температура обрабатываемого воздуха проходящего через установку должна составлять от 5 до 40 °С. Климатическое исполнение установки предназначено для эксплуатации в районах с умеренным климатом при температуре окружающего воздуха от −45 до +40 °С и относительной влажности не более 98 %.

Технические характеристики установки удаления запахов контейнерного типа

Блок-контейнер

Присоединительные размеры, мм:	
вход	800×800
выход	500×500
Условное давление внутри камеры	Разрежение
Число УФ-модулей, шт.	4
Общее число УФ-ламп, шт.	48
Габаритные размеры (длина×ширина×высота), мм	12000×2585×2865
Число ступеней очистки	2
Масса брутто, не более, кг	10 000
Материал:	
внутренняя обшивка	Коррозионно-стойкая сталь AISI 304
силовой каркас	Ст3
Отключение по перегреву, °С	60
Отключение при отсутствии потока воздуха через установку	Есть
Отключение установки по превышению показаний датчика метана, %	>1
Степень пыле- и влагозащищенности	IP 67
Ориентация камеры	Горизонтально

Расход воздуха, м^3/ч 10 000
Масса каталитической засыпки, кг . . . 3000

УФ-модуль

Число ламп в модуле, шт. 12
Масса УФ-модуля, кг 100
Габаритные размеры
(длина×ширина×высота), мм . . . . . 2310×360×1290

Лампа

Обозначение . . . . . АНО 680/189 (ALO 680/189)
Мощность, Вт:
без ЭПРА 580
с ЭПРА. 620
Ресурс работы, ч 8000
Срок службы с момента ввода
в эксплуатацию, год 2

ЭПРА

Тип . . . . . EPRA L~3x380-6x800-2223-52
Геометрические размеры, мм . . . . . 320×251×290
Масса, не более, кг 5,2
Средний срок службы ЭПРА
от даты изготовления, лет. 7
Средняя наработка на отказ, ч 25 000

Шкаф управления

Производитель корпуса . . . . . RITTAL
Габаритные размеры
(длина×ширина×высота), мм . . . . . 806×640×2105
Масса, не более, кг 240
Материал . . . . . Коррозионно-стойкая сталь AISI 304
Тепловыделение, не более, кВт 2,4
Степень пыле- и влаго-
защищенности . . . . . IP 54
Режимы управления . . . . . Местное (со шкафа управления)
Панель оператора . . . . . Текстовая (Siemens)
Отключение по перегреву, °С 60
Подсчет времени наработки . . . . . Есть

Блок ЭПРА

Производитель корпуса. . . . . RITTAL
Габаритные размеры
(длина×ширина×высота), мм . . . . . 806×605×2105
Масса, не более, кг 240
Материал . . . . . Коррозионно-стойкая сталь AISI 304
Тепловыделение, не более, кВт 1,4
Степень пыле- и влаго-
защищенности . . . . . IP 54
Отключение по перегреву, °С 60

Электропотребление

Напряжение питания, В . . . . . 380 ± 38 %
Частота питающего напря-
жения, Гц 50
Потребляемая мощность,
не более, кВт. 39
Коэффициент мощности,
не менее 0,96

Условия эксплуатации

Климатическое исполнение . . . . . У1-Уличное исполнение
Температура обрабатываемого
воздуха, °С . . . . . От +5 до +40
Относительная влажность
обрабатываемого воздуха при 25 °С,
не более, % 100
Температура окружающего
воздуха, °С . . . . . От −45 до +40
Относительная влажность окружающего
воздуха при 25 °С, не более, % 98

Установка состоит из следующих основных частей (рис. 1): блок-контейнер; ультрафиолетовый (УФ) модуль; блок каталитической засыпки; шкаф управления и шкаф электронной пускорегулирующей аппаратуры (ЭПРА).

Блок-контейнер предназначен для очистки воздуха от мелкодисперсных примесей, запахов сероводорода, аммиака, метана и меркаптанов. В блок-контейнере устанавливаются модули с амальгамными УФ-лампами, блок каталитической засыпки, шкаф управления, шкаф ЭПРА. УФ-модуль служит для размещения амальгамных УФ-ламп, генерирующих окислитель (озон). Блок каталитической засыпки — для размещения каталитической засыпки. Шкаф управления — для управления установкой и контроля технологических параметров ее работы, а также дистанционной передачи данных о работе установки. В шкафу управления расположены ЭПРА УФ-ламп. Шкаф ЭПРА предназначен для размещения ЭПРА, запускающих и регулирующих работу УФ-ламп, а также для обработки и передачи сигнала об исправности УФ-ламп в шкаф управления.

Блок-контейнер (рис. 2) представляет собой контейнер *1*, внутри которого установлены четыре УФ-модуля *2* и два блока каталитической засыпки *3*. На входе блок-контейнера установлен диффузор *5*, а на выходе — конфузор *6*, предназначенные для распределения и выравнивания потока воздуха на входе и выходе блок-контейнера соответственно. Для равномерного распределения потока воздуха в установке внутри блок-контейнера установлена вы-

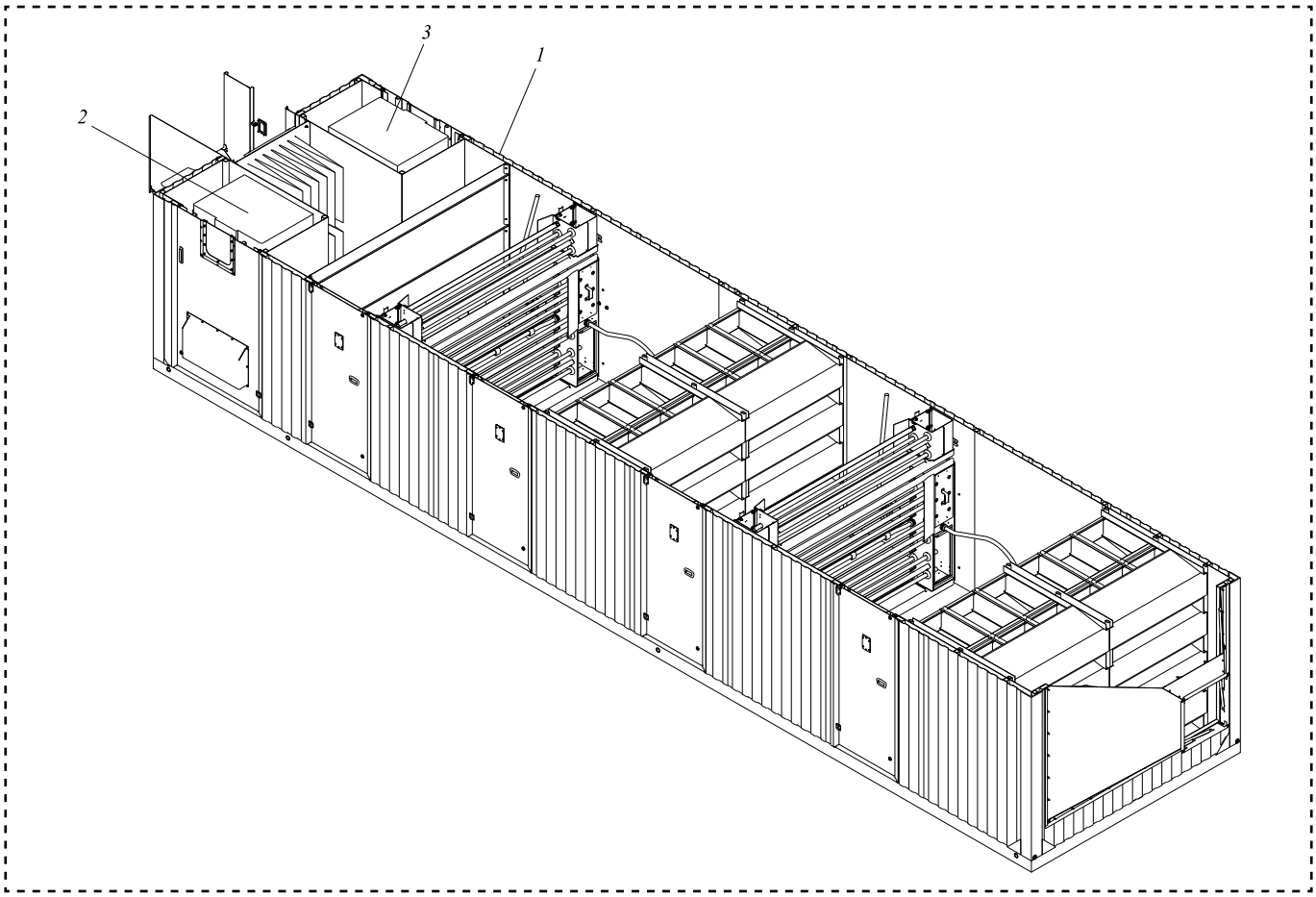


Рис. 1. Установка удаления запахов:
1 — блок-контейнер; *2* — шкаф управления; *3* — шкаф ЭПРА

равнивающая решетка *4*. Для очистки обрабатываемого воздуха от пыли и мелкодисперсных частиц после диффузора в блок-контейнере установлены плоский фильтр грубой очистки G4/F5 *14* и три фильтра F6 карманного типа *7*. Воздух поступает в блок-контейнер по воздуховоду через диффузор *5*, в котором происходит расширение потока воздуха и снижение его скорости. Затем обрабатываемый воздух проходит через фильтры G4/F5 и F6, где происходит предварительная очистка воздуха от пыли и мелкодисперсных частиц. После предварительной очистки воздух через выравнивающую решетку *4* поступает на первую стадию очистки.

На первой стадии очистки воздух обрабатывается озоном и различными радикалами, образующимися в процессе работы специальных УФ-ламп, установленных в УФ-модуле *2*. Озон и радикалы окисляют вредные вещества, содержащиеся в воздухе, в том числе аммиак и сероводород. Продуктами реакций окисления являются нейтральные соединения (соли неорганических кислот, углекислый газ и пары воды) оседающие на каталитической засыпке *3*.

Пройдя через блок каталитической засыпки *3*, обрабатываемый воздух поступает на вторую стадию очистки, которая по технологии очистки повторяет первую стадию.

После второй стадии очистки очищенный воздух через конфузор *6* по воздуховоду поступает в атмосферу. Вентилятор, установленный в воздуховоде после конфузора *6*, используется для создания в блок-контейнере разряжения воздуха, необходимого для его непрерывной и безопасной циркуляции через установку.

В блок-контейнере установлены датчик температуры *8*, необходимый для контроля температуры обрабатываемого воздуха, индикатор протока воздуха *9*, контролирующий прохождение воздуха через установку. Также внутри блок-контейнера установлен датчик метана *11*, контролирующий концентрацию

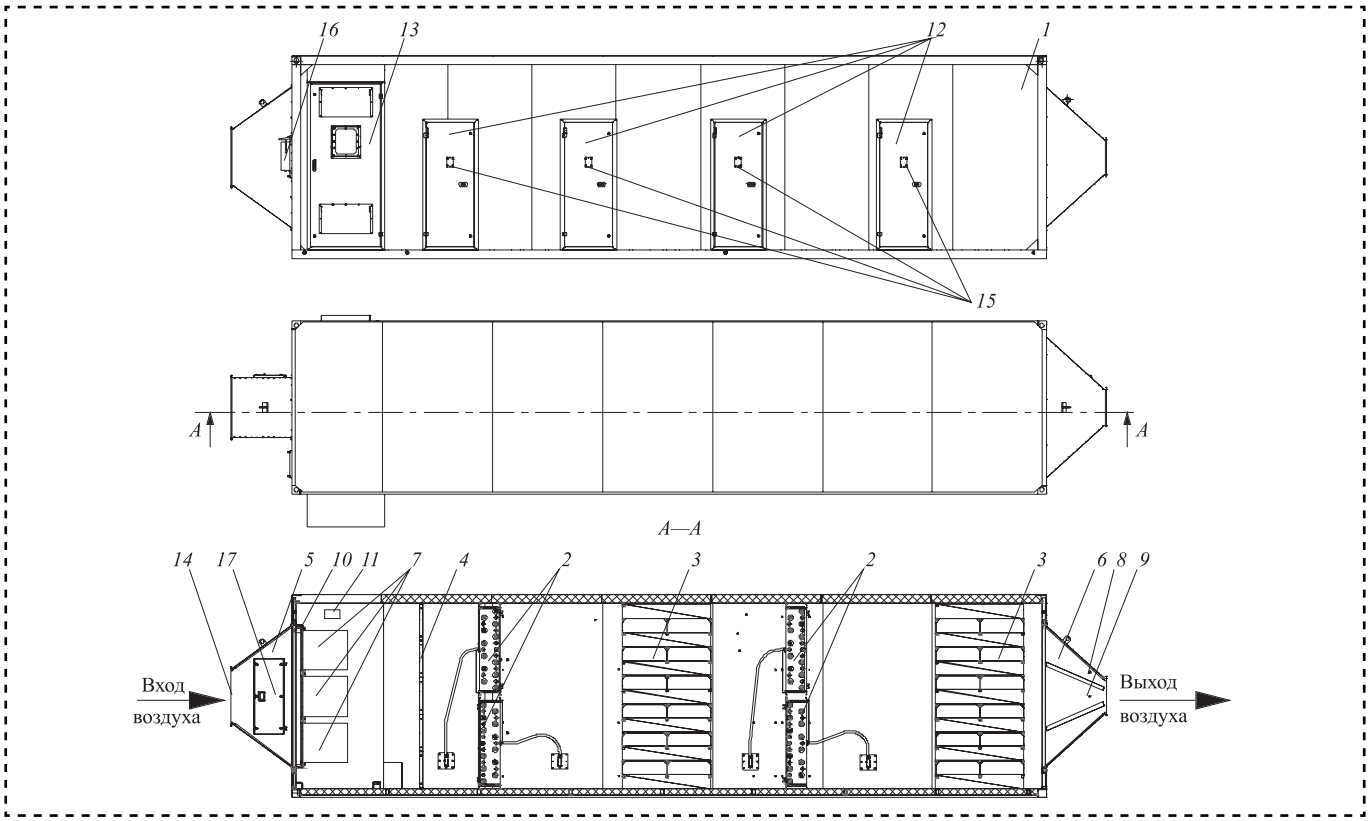


Рис. 2. Составные части блок-контейнера:
1 — контейнер; *2* — УФ-модуль; *3* — блок каталитической засыпки; *4* — выравнивающая решетка; *5* — диффузор; *6* — конфузор; *7* — фильтр F6; *8* — датчик температуры; *9* — индикатор протока воздуха; *10* — дифманометр; *11* — датчик метана; *12* — дверь обслуживания; *13* — дверь обслуживания шкафа управления; *14* — фильтр G4/F5; *15* — окно отбора проб; *16* — щит вводной; *17* — окно технологического обслуживания

метана в обрабатываемом воздухе. Для измерения разности давления воздуха на входе и выходе установки в блок-контейнере установлен дифманометр *10*.

Для обслуживания блок-контейнера предусмотрены двери *12*, *13* и окно технологического обслуживания *17*, которые должны быть закрыты во время работы установки. Для проведения отбора проб обрабатываемого воздуха, находящегося внутри блок-контейнера, на дверях обслуживания *12* установлены окна отбора проб *15*, которые также должны быть закрыты во время работы установки.

УФ-модуль, представленный на рис. 3, состоит из корпуса *1*, в котором установлены двенадцать УФ-ламп *2*, предназначенные для генерации окислителя (озон) и высокоактивных радикалов. Ламповые кабели собираются в защищенный гофрированный шланг *3*, заканчивающийся наборным разъемом *4*, через который УФ-модуль подсоединяется к блок-контейнеру.

Блок каталитической засыпки (рис. 4) состоит из двух боковых стенок *1*, средней стенки *2*, двенадцати задних стенок *3* и четырнадцати стенок-перегородок *4*.

Между стенками установлены семьдесят два контейнера *5*, в которых находится каталитическая засыпка.

Для предотвращения смещения контейнеров *5* при транспортировке предусмотрены ограничители *6*.

Шкаф управления (рис. 5) состоит из корпуса шкафа *1* установленного на цоколе *2*. На двери шкафа управления *3* располагаются элементы контроля и управления установкой, а также главный выключатель *8*.

Для осуществления вентиляции внутри шкафа управления установлены два вентилятора *5*, на двери и боковых панелях шкафа управления — вентиляционные решетки *4*. Для контроля температуры воздуха внутри шкафа предназначены датчик температуры *7* и термостат *19*.

В шкафу управления размещены четыре групповых ЭПРА *15*, а также элементы системы контроля и управления установкой и эле-

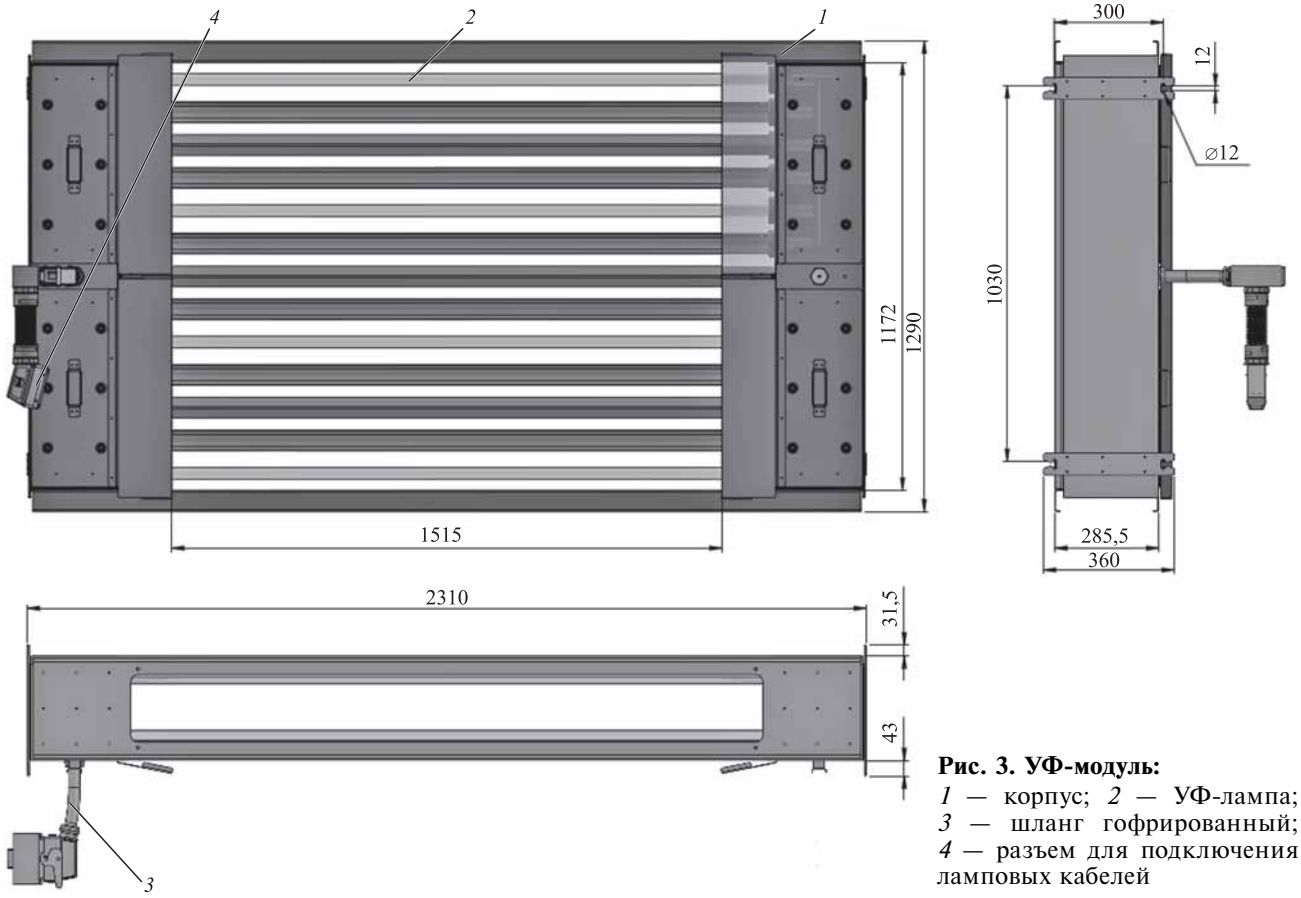


Рис. 3. УФ-модуль:
1 — корпус; *2* — УФ-лампа; *3* — шланг гофрированный; *4* — разъем для подключения ламповых кабелей

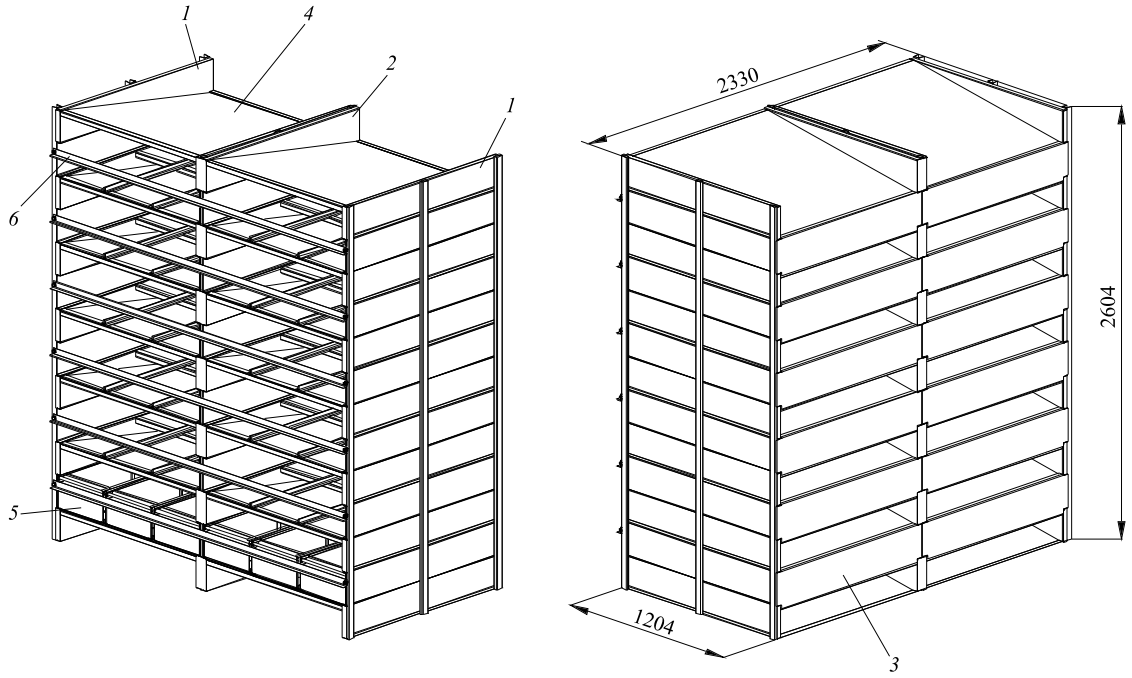


Рис. 4. Блок каталитической засыпки:
1 — стенка боковая; *2* — стенка средняя; *3* — стенка задняя; *4* — стенка-перегородка; *5* — контейнер; *6* — ограничитель

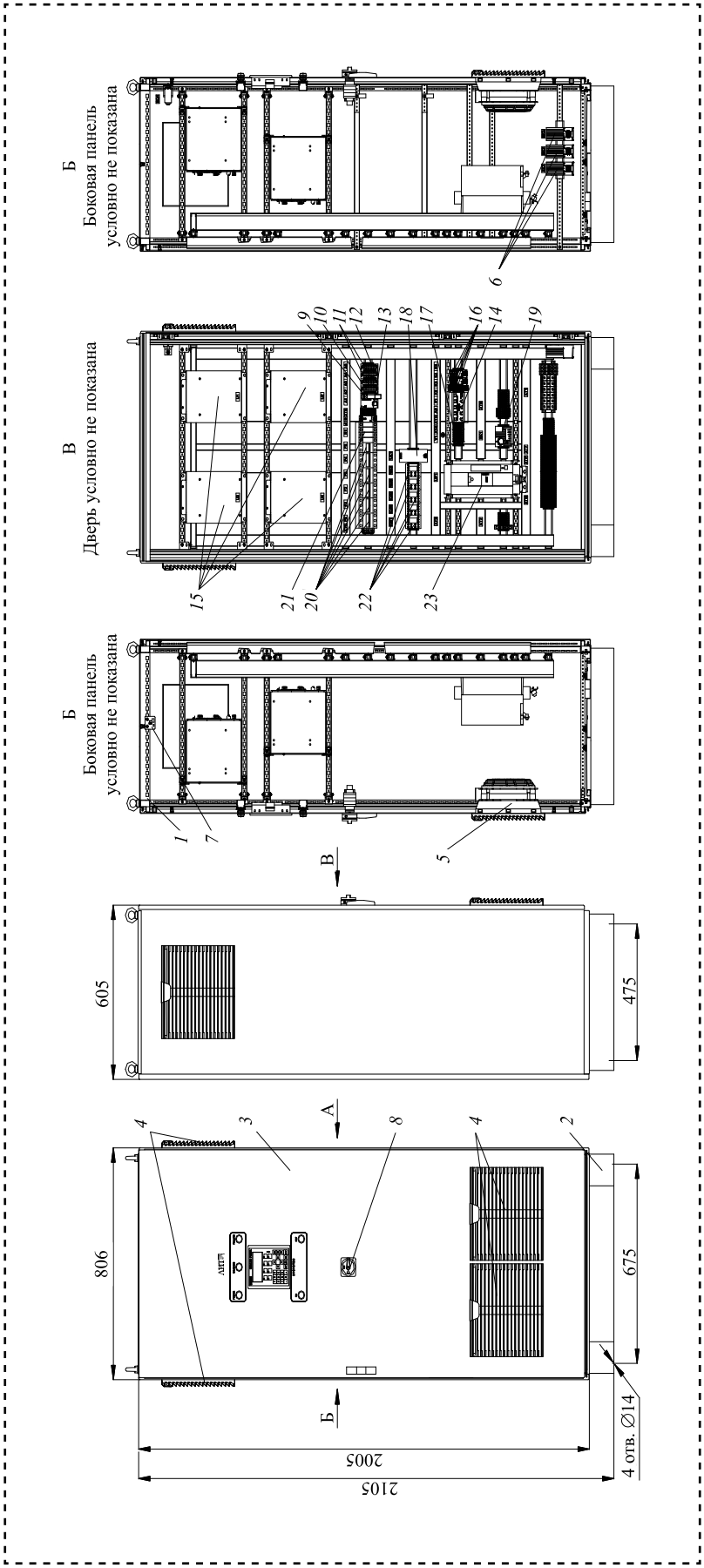


Рис. 5. Шкаф управления:
1 — корпус; *2* — цоколь; *3* — дверь; *4* — вентиляционная решетка; *5* — вентилятор; *6* — нагреватель; *7* — датчик температуры; *8* — главный выключатель; *9* — процессорный модуль; *10* — модуль дискретного вывода; *11* — модуль дискретного ввода; *12* — аналоговый модуль; *13* — реле контроля фаз; *14* — контроллер управления мощностью ламп; *15* — групповой ЭПРА; *16* — модуль релейного интерфейса; *17* — защита от перенапряжений; *18* — блок питания; *19* — термостат; *20* — автоматический выключатель; *21* — ограничитель перенапряжения класс С; *22* — контактор; *23* — частотный преобразователь

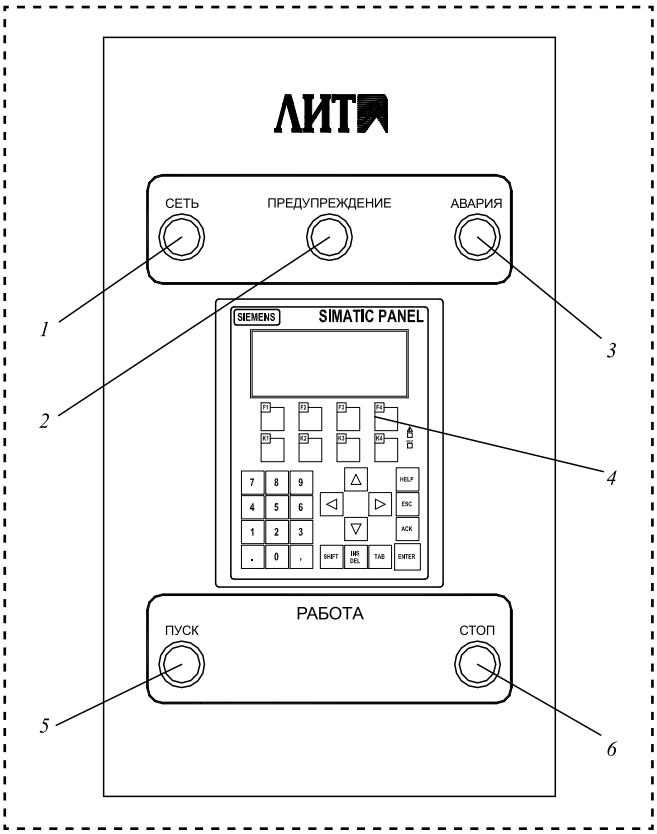


Рис. 6. Элементы управления и сигнализации:
1 — световой индикатор "СЕТЬ" (зеленый); *2* — световой индикатор "ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ" (желтый); *3* — световой индикатор "АВАРИЯ" (красный); *4* — панель оператора; *5* — кнопка "ПУСК" включения УФ-ламп; *6* — кнопка "СТОП" выключения УФ-ламп

менты силовой коммутации. В нижней части шкафа управления находятся нагреватели *6*.

На двери шкафа управления расположены следующие элементы управления и сигнализации (рис. 6):

- *1* — зеленый, с надписью "СЕТЬ", сигнализирует о подаче сетевого питания на шкаф управления;
- *2* — желтый, с надписью "ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ", сигнализирует о том, что некоторые технологические параметры установки не соответствуют номинальным значениям, но установка функционирует в полном объеме;
- *3* — красный, с надписью "АВАРИЯ", сигнализирует об аварийном состоянии установки.
- область "РАБОТА" с кнопками:
  5 — кнопка "ПУСК" включения установки;
  6 — кнопка "СТОП" выключения УФ-ламп.

Панель оператора *4* (см. рис. 6) служит для индикации состояния установки, настройки технологических параметров, управления отдельными компонентами.

ЭПРА Л~3х380-6х800-2223-52 предназначен для включения и обеспечения нормальной работы шести УФ-ламп АНО 680/189. Он обеспечивает предварительный прогрев электродов, поджиг и рабочий режим УФ-ламп.

ЭПРА состоит из корпуса, в который вставлены четыре платы и вентилятор. Одна — плата питания (ИП), остальные платы — двухканальные ламповые платы (ДК). Ламповая плата контролирует работу двух УФ-ламп и на ней установлены два светодиода, которые могут индицировать длинный или короткий импульс. При выключенной лампе светодиод не светится. Если лампа работает нормально, то светодиод светится постоянно. В случае неисправности светодиод мигает. Последовательность импульсов светодиодов отражает состояние ЭПРА (этапы работы) или характеристику неисправности (код ошибки). Если УФ-лампа не горит, то необходимо проверить и при необходимости заменить платы (ИП и/или ДК), входящие в состав ЭПРА. Также необходимо проверить работу соответствующей УФ-лампы и при необходимости заменить ее.

В случае выхода из строя вентилятора или других элементов корпуса ЭПРА необходимо заменить корпус ЭПРА.

Шкаф ЭПРА (рис. 7) состоит из корпуса *1* установленного на цоколе *2*. На двери *3* шкафа ЭПРА располагается сигнальная лампа *8* "РАБОТА" зеленого цвета, сигнализирующая о включении шкафа ЭПРА.

Для вентиляции внутри шкафа ЭПРА установлен вентилятор *5*, на двери и боковых панелях шкафа ЭПРА — вентиляционные решетки *4*. Для контроля температуры воздуха внутри шкафа предназначены термостат *7* и две термопары *18*.

В шкафу ЭПРА размещены четыре групповых ЭПРА *15*, а также элементы управления и контроля работы УФ-ламп и силовой коммутации. В нижней части шкафа ЭПРА находятся нагреватели *6*.

Термостат шкафа ЭПРА предназначен для выдачи сигнала отключения УФ-ламп в случае перегрева шкафа. Термостат устанавли-

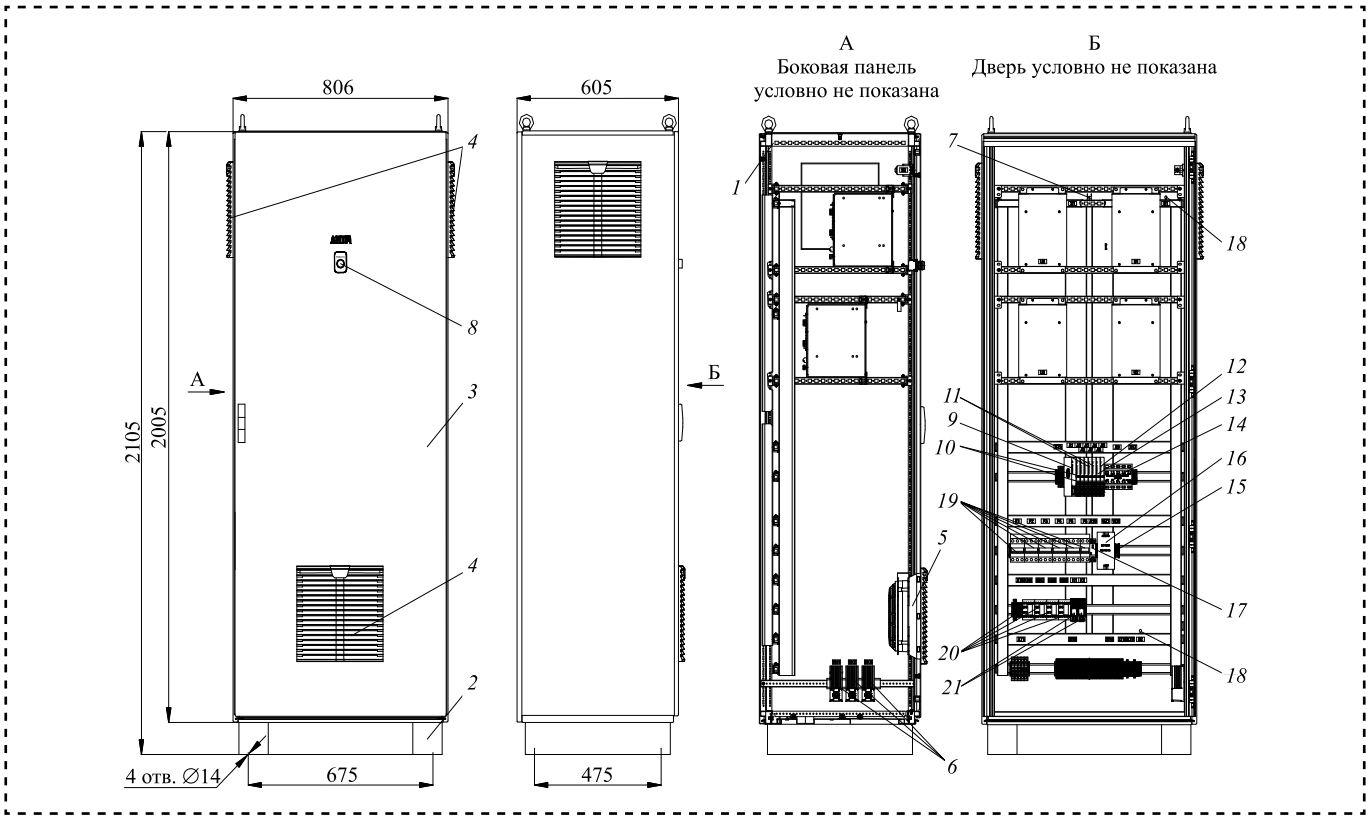


Рис. 7. Шкаф ЭПРА:
1 — корпус; *2* — цоколь; *3* — дверь; *4* — вентиляционная решетка; *5* — вентилятор; *6* — нагреватель; *7* — термостат; *8* — лампа сигнальная "РАБОТА"; *9* — интерфейсный модуль; *10* — модуль дискретного вывода; *11* — модуль дискретного ввода; *12* — модуль аналогового ввода; *13* — модуль распределения потенциалов; *14* — контроллер управления мощностью ламп; *15* — защита от перенапряжений; *16* — блок питания; *17* — реле контроля фаз; *18* — термопара; *19* — автоматический выключатель; *20* — контактор; *21* — модуль релейного интерфейса

вается в шкафу ЭПРА и представляет собой биметаллический термовыключатель. Термовыключатель срабатывает, если достигнута заданная температура.

Технические характеристики термостата шкафа ЭПРА

Тип	2455R-65/55 нормально замкнутый
Температура срабатывания, °С	+65
Температура обратного переключения,°С	+55

В процессе эксплуатации установки необходимо контролировать следующие параметры: проток обрабатываемого воздуха через установку; исправность УФ-ламп; время наработки установки; концентрацию метана.

Проток обрабатываемого воздуха через установку регулируется вентилятором с помощью частотного преобразователя, установленного в шкафу управления.

Время наработки установки и исправность УФ-ламп контролируется автоматически и выводится на шкаф управления.

Данное оборудование широко применяется в разнообразных областях: пищевая промышленность, медицина, фармацевтическое производство, сельское хозяйство, транспорт, объекты социальной сферы, что позволяет создать лучшее решение для людей и экологии.

Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Установки для обеззараживания воздуха и воды // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5. С. 41—46.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Автоматизированная сборка компактных люминесцентных ламп // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 2. С. 36—38.

3. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 7. С. 25—28.

УДК 004.4

А.Н. Алпатов, А.Р. Кадиев, *канд. техн. наук,* **А.В. Рощин,** *канд. техн. наук*
(Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники)
E-mail: kadiev_ar@mail.ru

Проблемы оптимизации нагрузки в распределенных вычислительных системах

Предлагается методика прогнозирования балансировки нагрузки в распределенных вычислительных системах. Дается обзор основных методов управления нагрузкой в таких системах.

The article deals with the problem of load balancing in distributed computing systems. A review of the main methods of load control in such systems is given, the forecasting technique for load control is proposed.

Ключевые слова: балансировка нагрузки, распределенные вычисления, прогноз.

Keywords: load balancing, distributed computing, forecast.

Наличие большого числа практически ненагруженных компьютеров в сети привело к возможности построения распределенных вычислительных систем (РВС) различного назначения. В этих условиях РВС создается из компьютеров, основанных на различных аппаратных платформах, различной вычислительной мощности (от тяжелых настольных игровых систем до планшетов и даже смартфонов) и с различными операционными системами [1]. Попытки решать более или менее серьезные задачи с использованием гетерогенных систем такого вида приводят к необходимости управления потоками заданий, раздаваемых появляющимся в РВС свободным ресурсам, для обеспечения, по возможности, равномерного распределения нагрузки отдельных узлов системы. Возникновение дисбаланса нагрузки связано прежде всего с неоднородностью компонентов, входящих в состав гетерогенных РВС, что определяет неоднородность структуры распределенного приложения, выполняемого в РВС [2].

В общем случае задача балансировки нагрузки сводится к обеспечению такого состояния РВС, при котором готовность данных равномерная, а число транзакций между узлами системы минимально.

Для решения указанной задачи применяются различные методики, основной целью которых обычно является увеличение пропускной способности системы, повышение надежности работы РВС, достижение максимального использования имеющихся вычислительных ресурсов, а также снижение общего времени выполнения задачи [1, 3]. Процесс управления балансировкой может проводиться на разных уровнях эталонной модели OSI (Open Systems Interconnection basic reference model).

Способы достижения поставленных целей обычно связаны с перераспределением потоков заданий.

В общем случае можно выделить обобщенную классификацию методов балансировки загрузки вычислительных узлов [4—6].

По характеру распределения нагрузки по узлам РВС различают:

— статическую балансировку;

— динамическую балансировку (перераспределение).

При статическом подходе к балансировке нагрузки на узлы системы вся информация о характеристиках узлов, загрузки сети известна заранее. Таким образом, решение о балансировке нагрузки принимается изначально и не меняется со временем. Основными преимуществами данного подхода являются простота реализации и малые накладные расходы на этапе функционирования, так как не нужно отслеживать состояние всей системы и ее узлов.

Методы статической балансировки не позволяют учитывать главную особенность современной РВС — спонтанное появление и исчезновение отдельных узлов системы, связанное с включением/выключением компьютеров, а также с появлением и исчезновением отдельных узлов в доступном сегменте сети (что связано с мобильными устройствами различного рода).

Динамическая балансировка распределенной системы заключается в динамическом распределении нагрузки на узлы РВС в процессе функционирования, что с одной стороны позволяет эффективно использовать ресурсы системы, с другой стороны требует постоянного наблюдения состояния РВС. Динамическая балансировка особенно актуальна, например в задачах математического моделирования, когда каждая итерация требует различных ресурсов.

Среди динамических методов балансировки нагрузки РВС можно выделить следующие: Weighted round robin (WRR, взвешенное круговое распределение), Leasted Loaded (LL, наименее загруженный), Least Connected (LC, наименьшее количество соединений) и некоторые другие.

Для иллюстрации работы динамических методов рассмотрим работу алгоритма Leasted Loaded. При использовании алгоритма LL выбор узла для передачи данных осуществляется по критерию минимальной загрузки его ресурсов (рис. 1). Схожее действие имеет метод Least Connected (наименьшее количество соединений), где узел выбирается с наименьшим количеством соединений (TCP/IP, UDP).

Динамические методы балансировки подразделяются на централизованные и децентрализованные, локальные и глобальные, кооперативные и некооперативные, адаптивные и неадаптивные [4].

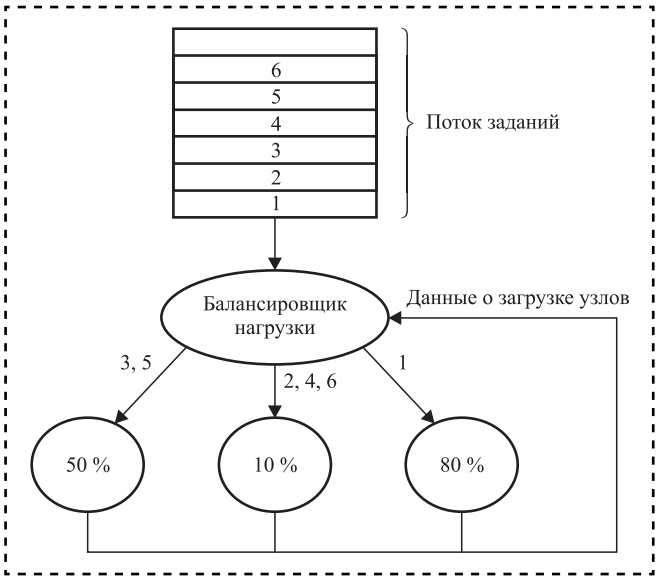


Рис. 1. Принцип работы алгоритма Leasted Loaded

Централизованные методы основаны на классической модели ведущий/ведомый. В такой модели предполагается наличие центрального сервера-планировщика, который распределяет некоторое множество заданий на ведомые узлы системы. Существенным недостатком такого подхода к организации управления заданиями является ограниченная масштабируемость системы, вследствие наличия такого узкого места, как сервер-планировщик (рис. 2).

При децентрализованном подходе все или часть узлов, входящих в систему, участвуют в процессе распределения нагрузки. Децен-

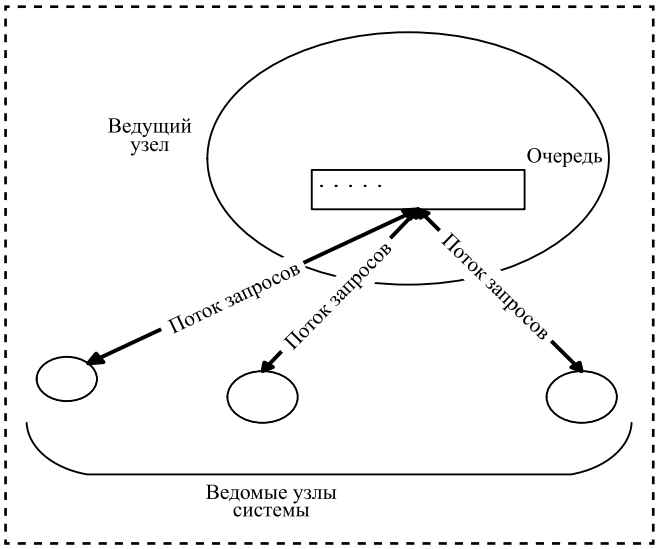


Рис. 2. Централизованный метод балансировки нагрузки (управление заданиями)

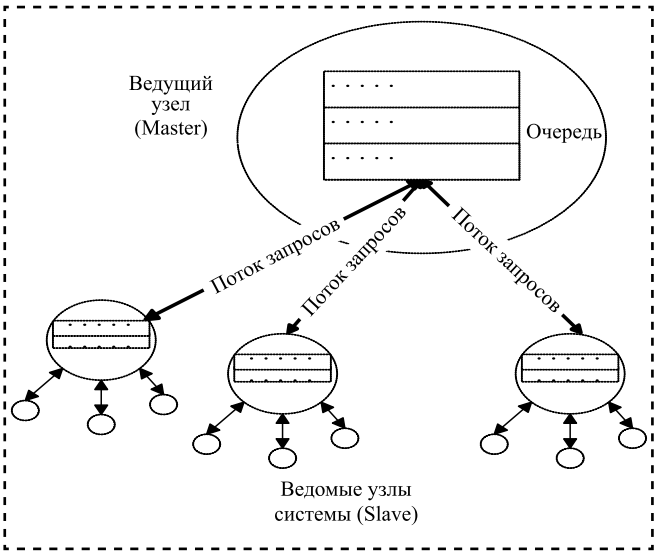


Рис. 3. Пример организации децентрализованной динамической балансировки

трализованные методы позволяют преодолеть проблему наличия узкого места", однако характеризуются повышенными накладными расходами на организацию передачи заданий. Возможный подход к организации динамической децентрализованной балансировки, в виде организации совместного пула, показан на рис. 3.

Особого внимания заслуживают динамические методы балансировки нагрузки, применяемые для управления потоками в децентрализованных РВС, например в пиринговых P2P сетях. Так как эти системы полностью децентрализованы, в них отсутствует управляющий сервер, который распределяет потоки запросов в системе. Один из возможных вариантов решения проблемы — концепция виртуальных серверов [7].

Процесс балансировки нагрузки осуществляется виртуальным сервером, который реализован на реальном узле системы. При этом каждый реальный узел системы может содержать несколько виртуальных серверов (рис. 4).

В альтернативной классификации методов балансировки нагрузки, они делятся на контентно-зависимые и контентно-независимые [8]. При использовании контенто-зависимых алгоритмов балансировка нагрузки проводится путем анализа содержимого запроса передаваемого на узел системы, и в зависимости от его типа передача происходит на тот узел системы, который обрабатывает данный тип запроса.

Все рассмотренные методы балансировки нагрузки в гетерогенных РВС обладают одним существенным недостатком. В них распределение заданий проводится либо по априорным данным о состоянии узлов сети (статические методы), либо по уровню загрузки узла сети (динамические методы). Относительно последних во всех методах остается неясным, что именно определяется как текущая загрузка узла сети.

Необходимо совершенствование методов получения оценок текущей загрузки узлов, а также использования прогнозных оценок загрузки узлов для более эффективного распределения заданий по узлам сети [5, 9].

Для получения "хороших" оценок текущей загрузки узлов, а тем более прогнозирования

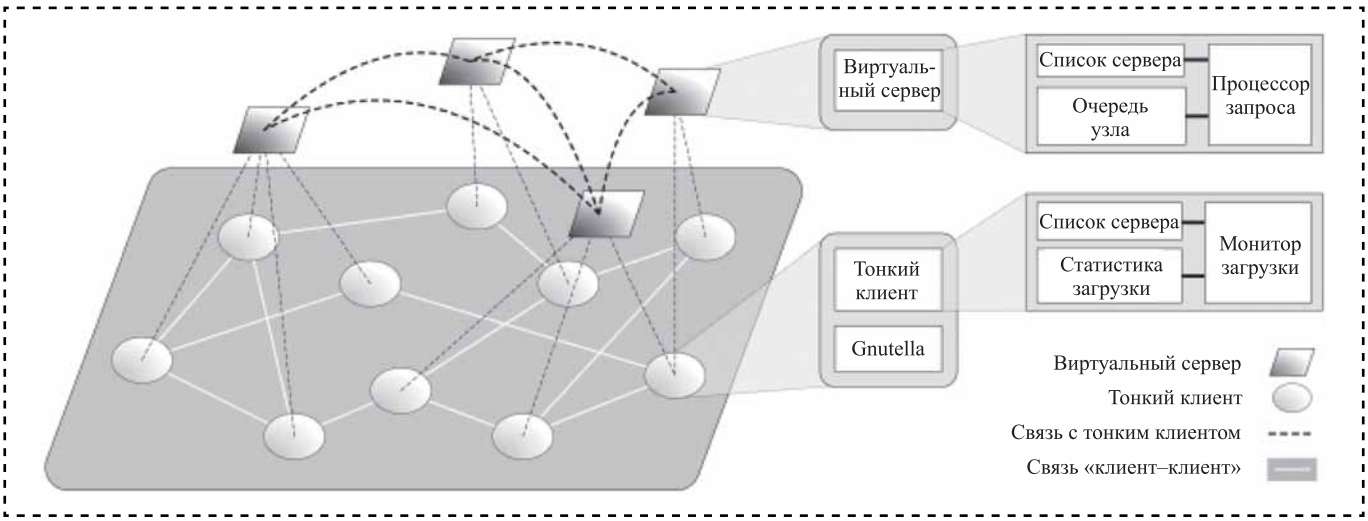


Рис. 4. Концепция виртуального сервера в структуре P2P [7]

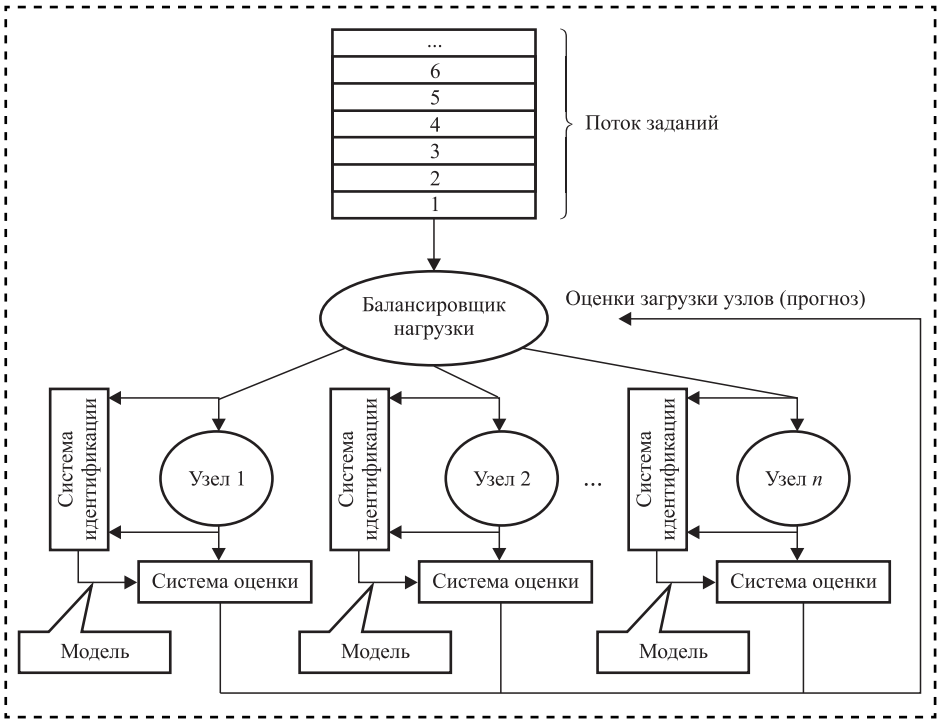


Рис. 5. Подход, основанный на использовании динамических моделей загрузки узлов

загрузки, необходимы адекватные модели, описывающие загрузку узлов, определяемую как внутренними, так и внешними задачами.

Подход, основанный на использовании динамических моделей загрузки узлов, показан на рис. 5.

По сути явлений в узле ОВС динамическая модель загрузки должна быть нелинейной, и более того, нестационарной. При достаточно большом числе узлов сети и процессов в каждом узле можно предположить, что динамическая модель с достаточной точностью может быть линейной. Есть все основания предполагать, что процессы, выполняемые в отдельных узлах сети, являются некоррелированными. С несколько меньшей уверенностью то же можно предположить относительно процессов, выполняемых на одном узле. Однако с чего-то надо начинать. Поэтому имеет смысл начать с линейных динамических моделей и с корреляционных методов построения оценок.

Часто при решении задач моделирования потоков в РВС используются модели, учитывающие свойства фрактальности сетевого трафика [10]. К моделям, учитывающим фрактальные свойства телетрафика, относятся, например, фрактальный гауссовский шум, ON/OFF-модель и ряд других.

Выводы

Современные исследования в области разработки методов управления потоками заданий в РВС показывают ограниченность общепринятых подходов при решении задачи управления потоками заданий. Использование прогностических моделей позволяет повысить эффективность процессов управления потоками в РВС.

Библиографический список

1. **Бухановский А.В., Иванов С.В.** Особенности оптимизации распределения вычислительной нагрузки в задачах параллельной обработки информации и имитационного моделирования // Материалы конференции "ИММОД-2003", 2003. С. 86—89.

2. **Миков А.И., Замятина Е.Б., Осмехин К.А.** Метод динамической балансировки процессов имитационного моделирования // Материалы Всероссийской научно-технической конференции "Методы и средства обработки информации МСО-2005". М.: Изд-во МГУ. 2005. С. 472—478.

3. **Юрич М.Ю.** Анализ систем и методов балансировки нагрузки вычислительных систем // Научный вестник Черновицкого национального университета. 2010. С. 14—19.

4. **Distributed** System Design. Jie Wu CRC Press Publishing Company, Boca Raton, FL. 1998. 496 p.

5. **Бершадский А.М., Курилов Л.С., Финогеев А.Г.** Исследование стратегий балансировки нагрузки в системах распределенной обработки данных // Известия вузов. Поволжский регион. Технические науки. 2009. № 4. С. 38—48.

6. **Бельков Д.В.** Алгоритмы балансировки загрузки процессоров параллельной вычислительной системы. Моделирование и компьютерная графика // Матер. 1-й Междунар. науч.-техн. конф. Донецк, 4—7 октября 2005. ДонНТУ, 2005. С. 134—140.

7. **Pournaras E., Exarchakos G., Antonopoulos N.** Load-driven neighbourhood reconfiguration of gnutella overlay // Computer Communications. 2008. 31(13). 3030—3039 p.

8. **Daryapurkar A., Deshmukh M.V. M.** Efficient Load Balancing Algorithm in Cloud Environment //International Journal Of Computer Science And Applications. 2013. Т. 6. № 2.

9. **Структура** телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: автореф. дис.... канд. техн. наук. М.: МЭИ, 2004. 199 с.

10. **Leland W., Taqqu M., Willinger W., Wilson D.** On the selfsimilar nature of Ethernet traffic // IEEE/ACM Transactions on Networking. 1994. 2 (1). P. 115.

УДК 621.891+06

Е.О. Лагунова, *канд. техн. наук,* **А.Н. Гармонина, Е.А. Копотун,** *канд. техн. наук*
(Ростовский государственный университет путей сообщения)
E-mail: opatskih@yandex.ru

Нелинейные эффекты воздействия электропроводящей смазки на шип подшипника, обладающего демпфирующими свойствами

На основе нелинейного уравнения движения несжимаемой электропроводящей смазки с учетом сил инерции, уравнения неразрывности и уравнения Дарси приводится расчетная модель радиального подшипника скольжения, обладающего демпфирующими свойствами. В результате расчетов найдено поле скоростей и давлений в смазочном слое при учете сил инерции и без учета при наличии электромагнитных полей. Получены многопараметрические выражения для основных рабочих характеристик, обусловленных наличием электромагнитных полей и неоднородного пористого слоя опорной поверхности подшипника, силой инерции. Дана оценка влияния указанных параметров на основные рабочие характеристики подшипника.

On the basis the nonlinear equations of motion of an incompressible electrically conductive grease based on inertial forces, the continuity equation and the equation of Darcy is a computational model of the radial plain bearing possessing damping properties. The calculations found for the velocity and pressure in the lubricant layer when account is taken inertia forces and without the presence of electromagnetic fields. Subsequently expressions are obtained for the main multiparameter performance due to the presence of electromagnetic fields and non-homogeneous porous layer of the bearing surface of the bearing, the force of inertia. The estimation of the influence these parameters on the basic performance of the bearing.

Ключевые слова: электропроводящая смазка, демпфирующие свойства, силы инерции, электромагнитное поле.

Keywords: conductive lubrication, damping properties, inertia forces, electromagnetic field.

Развитие современного машиностроения предъявляет все более жесткие требования к различным устройствам как в новых областях техники (атомная энергетика, ракетно-космическая), так и в традиционных (транспортное машиностроение, приборостроение).

В последнее время практический интерес вызывают исследования механических устройств с применением нетрадиционных уплотнительно-смазочных материалов, таких как магнитные жидкости. Они широко используются не только в уплотнителях [1, 2], но и в подшипниковых узлах в качестве смазочных материалов, обладающих электропроводящими свойствами. В расчетных моделях подшипников скольжения, работающих на электропроводящих смазочных материалах, обладающих демпфирующими свойствами, проницаемость пористого слоя считается постоянной, при этом не учитывается сила инерции [3—5].

Предложено проводить в линейной постановке гидродинамический расчет радиального подшипника бесконечной длины с переменной по окружности проницаемостью пористого слоя, а затем — асимптотическое решение этой задачи с учетом сил инерции для случая "тонкого слоя".

Постановка задачи

Рассматривается установившееся течение электропроводящей вязкой несжимаемой жидкости в зазоре радиального подшипника

бесконечной длины. Вкладыш с пористым слоем переменной проницаемости в окружном направлении, запрессованный в нагруженный корпус, считается неподвижным, а шип вращается с угловой скоростью Ω.

Переместим начало полярной системы координат (r; θ) в центр подшипника, уравнения контуров подшипника и шипа запишем в виде:

$$c_0 : r = r_0(1+\tilde{H});\ \ r = b - r_0;$$

$$H = \varepsilon\cos\theta - \frac{1}{2}\varepsilon^2\sin^2\theta;\ \ \varepsilon = \frac{e}{a} < 1,$$

где e — эксцентриситет; b — радиус подшипника; r_0 — радиус шипа; $\tilde{H}$ — толщина пористого слоя.

Проницаемость пористого слоя задаем как сумму двух слагаемых:

$$k = k_0 + \tilde{A}\sin\omega\theta,$$

где $\tilde{A}/k_0 < 1$ — малая безразмерная величина; ω — определяется из условия максимума несущей способности; k_0 — заданная постоянная величина.

Учтем, что $\tilde{A}/k_0 \ll 1$, осредним проницаемость в интервале [0, 2π], тогда:

$$k = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} k_0\left(1+\frac{\tilde{A}}{k_0}\sin\omega\theta\right)d\theta = \\ = k_0\left[1+\frac{\tilde{A}}{2k_0\omega\pi}(\cos 2\pi\omega - 1)\right] = k^* k_0. \tag{1}$$

Будем исходить из простейших уравнений "тонкого слоя" для электропроводящей вязкой несжимаемой жидкости, уравнения неразрывности и уравнения Дарси при наличии электромагнитного поля с учетом выражения (1):

$$\frac{\partial p'}{\partial r'} = 0,\ \ \mu\frac{\partial^2 \mathrm{v}'_\theta}{\partial r'^2} = \frac{1}{r'}\frac{\partial p'}{\partial\theta} + \\ + \rho\left(\mathrm{v}'_{r'}\frac{\partial \mathrm{v}'_\theta}{\partial r'} + \frac{\mathrm{v}'_\theta}{r'}\frac{\partial \mathrm{v}'_\theta}{\partial\theta} - \frac{\mathrm{v}'_{r'}\mathrm{v}'_\theta}{r}\right) - \sigma B'\left(E' - \mathrm{v}'_\theta B'\right); \\ \frac{\partial \mathrm{v}_{r'}}{\partial r'} + \frac{\mathrm{v}'_{r'}}{r'} + \frac{1}{r'}\frac{\partial \mathrm{v}'_\theta}{\partial\theta} = 0; \\ \frac{\partial^2 P'}{\partial r'^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial P'}{\partial r'} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 P'}{\partial\theta^2} = 0, \tag{2}$$

где μ — динамический коэффициент вязкости; p' — гидродинамическое давление в смазочном слое; $\mathrm{v}'_{r'}$, v'_θ — векторы скоростей; $\bar{E} = \{0,\ 0,\ E'\}$ — вектор напряженности электрического поля; P' — давление в пористом слое; ρ — плотность; $\bar{B} = \{B', 0, 0\}$ — вектор магнитной индукции. Предполагается, что E', B' и скорость течения жидкости таковы, что можно пренебречь влиянием на приложенные электрическое и магнитное поля (предположение характеризуется малостью числа Рейнольдса).

Значения $E'(r,\ 0)$ и $B'(r,\ 0)$ считаются заданными и удовлетворяющими уравнениям Максвелла:

$$\mathrm{div}\bar{B} = 0;\ \ \mathrm{rot}\bar{E} = 0. \tag{3}$$

Данные уравнения удовлетворяют: $E' = \mathrm{const}$; $B' = \dfrac{B_0}{r'}$; $B_0 = \mathrm{const}$.

Рассмотрим систему уравнений (2), учитывая выражения (3) при граничных условиях вида:

$$\mathrm{v}'_{r'} = -\frac{k}{\mu}\frac{\partial P'}{\partial r'}\ \text{при}\ r' = r_0;\ \ \mathrm{v}'_\theta = \Omega r_0\ \text{при}\ r' = r_0;$$

$$p' = P'\ \text{при}\ r' = r_0;\ \ \frac{\partial P'}{\partial r'} = 0\ \text{при}\ r' = r_0 - H;$$

$$\mathrm{v}'_r = 0,\ \ \mathrm{v}'_0 = 0\ \ \text{при}\ \ r' = r_1 + e\cos\theta; \\ p'(0) = p'(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}, \tag{4}$$

где r_0 — радиус шипа; r_1 — радиус подшипника; e — эксцентриситет; k — проницаемость пористого слоя; H — толщина пористого слоя.

Осуществим переход в смазочном слое к безразмерным переменным по формулам:

$$\mathrm{v}'_{r'} = \Omega\delta u;\ \ \mathrm{v}'_0 = \Omega r_0 \mathrm{v};\ \ r' = r_0 + \delta r; \\ \delta = r_1 - r_0;\ \ p' = p^* p;\ \ p^* = \frac{\mu\Omega r_0^2}{\delta^2}. \tag{5}$$

Аналогично, в пористом слое:

$$r' = Hr^*;\ P' = p^* P. \tag{6}$$

С учетом выражений (5) и (6) система уравнений (2) с точностью до членов $O(\delta N)$, $O\left(\dfrac{\delta}{r_0}\right)$ запишется в виде:

$$\frac{\partial p}{\partial r}=0,\ \frac{\partial^2 \mathrm{v}}{\partial r^2}=\frac{dp}{d\theta}-A+N\mathrm{v}+\mathrm{Re}\left(u\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial r}+\mathrm{v}\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \theta}\right);$$
$$\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial \theta}=0,\ \frac{\partial^2 P}{\partial r^{*2}}+\frac{1}{r^*}\frac{\partial P}{\partial r^*}+\frac{1}{r^{*2}}\frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2}=0, \quad (7)$$

где $A=\frac{\sigma B_0\delta^2 E'}{\mu r_0^2\Omega}$; N — число Гартмана, $N=\frac{6B_0^2\delta^2\sigma}{\mu r_0^2}$; $\mathrm{Re}=\frac{\rho\Omega\delta^2}{\mu}$.

Граничные условия (4) примут вид: $u=0$, $\mathrm{v}=0$ при $r=1+\eta\cos\theta$

$$u\big|_{r=0}=M\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}};$$
$$\mathrm{v}\big|_{r=0}=1, \quad (8)$$
$$p=P\Big|_{r^*=\frac{r_0}{H}},\ \left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}-1}=0,\ p(0)=p(2\pi)=\frac{p_g}{p^*},$$

где $M=-\frac{kr_0^2}{H\delta^3}$.

В дальнейшем в правой части второго уравнения системы (7) скорость v заменим ее наибольшим значением.

Приведем точное автомодельное решение рассматриваемой задачи без учета сил инерции:

$$\mathrm{v}=\frac{\partial\psi}{\partial r}+V(r,0);\ u=-\frac{\partial\psi}{\partial\theta}+U(r,0);$$
$$\psi=\tilde\psi(\xi);\ V=\tilde r(\xi);\ U(r,0)=\tilde u(\xi)h_0';$$
$$\xi=\frac{r}{h(\theta)};\ \frac{dp}{d\theta}-A+N=\frac{\tilde C_1}{h^2(\theta)}+\frac{\tilde C_2}{h^3(\theta)}, \quad (9)$$
$$h(\theta)=1+\eta\cos\theta,$$

где $\eta=\frac{e}{\delta}$.

Подставляя решение (9) в выражения (7) и (8) получим:

$$\tilde\psi'''(\xi)=\tilde C_2,\ \tilde{\mathrm{v}}''=\tilde C_1;\ \tilde u'-\xi\tilde{\mathrm{v}}'=0;$$
$$\tilde\psi'=0;\ \mathrm{v}=0;\ \tilde u=0; \quad (10)$$

$$\tilde{\mathrm{v}}=1,\ \tilde u\big|_{\xi=0}=M\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}},\ \int\tilde{\mathrm{v}}(\xi)d\xi=\tilde u(0);$$
$$\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}-1}=0,\ p=P\Big|_{r^*=\frac{r_0}{H}}. \quad (11)$$

Решение задачи (10)—(11) находим непосредственным интегрированием:

$$\tilde{\mathrm{v}}=\frac{\tilde C_1\xi^2}{2}-\left(\frac{\tilde C_1}{2}+1\right)\xi+1;\ \tilde\psi'=\frac{\tilde C_2}{2}\left(\xi^2-\xi\right). \quad (12)$$

Перейдем к определению давления в смазочном слое, которое находится из уравнения:

$$\frac{dp}{d\theta}=\frac{\tilde C_1}{h^2(\theta)}+\frac{\tilde C_2}{h^3(\theta)}+A-N. \quad (13)$$

Интегрируя уравнение (13), получим:

$$p=A\theta-N\theta+\tilde C_1\int_0^\theta(1-2\eta\cos\theta)d\theta+$$
$$+\tilde C_2\int_0^\theta(1-3\eta\cos\theta)d\theta+\frac{p_g}{p^*}.$$

Используя граничные условия $P(0)=2\pi$, имеем:

$$\tilde C_2=-\tilde C_1-A+N. \quad (14)$$

С учетом (14) для p получим следующее выражение:

$$p=\tilde C_1\eta\sin\theta+3\eta\sin\theta(A-N)+\frac{p_g}{p^*}. \quad (15)$$

Решение уравнения Дарси представлено в виде:

$$P(r^*,\theta)=$$
$$=R\left(r^*\right)\left(\tilde C_1\eta\sin\theta+3\eta\sin\theta(A-N)\right)+\frac{p_g}{p^*}. \quad (16)$$

Подставляя выражение (16) в уравнение Дарси для определения функции $R(r^*)$, перейдем к следующему дифференциальному уравнению и граничным условиям:

$$R''\left(r^*\right)+\frac{R'}{r^*}-\frac{R}{r^{*2}}=0; \quad (17)$$

$$\left.\frac{dR}{dr^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}-1}=0,\ R\left(\frac{r_0}{H}\right)=1. \quad (18)$$

Решение задачи (17)—(18) находим интегрированием:

$$R\left(r^*\right)=\frac{r_0Hr^*}{2r_0^2-2Hr_0+H^2}+$$
$$+\frac{r_0\left(r_0^2-2Hr_0+H^2\right)}{H\left(2r_0^2-2Hr_0+H^2\right)r^*}. \quad (19)$$

Таким образом, решение задачи будет найдено после определения константы $\tilde{C}_1$. Интегрируя уравнение неразрывности по ξ от 0 до 1, приходим к следующему уравнению:

$$M\left.\frac{\partial P}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}} = \int_0^1 \tilde{\mathrm{v}}(\xi)d\xi. \qquad (20)$$

С учетом формул (12), (16) и (19) для $\tilde{C}_1$ получим следующее выражение:

$$M\left(\tilde{C}_1 + 3(A-N)\right)\left(\frac{r_0 H}{2r_0^2 - 2Hr_0 + H^2} - \frac{1}{\left(\frac{r_0}{H}\right)^2}\frac{r_0(r_0^2 - 2Hr_0 + H^2)}{H(2r_0^2 - 2Hr_0 + H^2)}\right) = \frac{1}{2} - \frac{\tilde{C}_1}{12}. \qquad (21)$$

Решая уравнение (21) относительно $\tilde{C}_1$ имеем:

$$\tilde{C}_1 = 6\frac{2r_0^3 - 2Hr_0^2 + r_0H^2 - 12MNH^2r_0 + 6MNH^3 + 12MAN^2r_0 - 6MAH^3}{2r_0^3 - 2Hr_0^2 + r_0H^2 + 24MH^2r_0 - 12MH^3}, \qquad (22)$$

где $M = -\frac{r_0^2}{H\delta^3}k_0\left[1 + \frac{\tilde{A}}{2k_0\omega\pi}(\cos 2\pi\omega - 1)\right]$.

Перейдем к определению основных рабочих характеристик подшипника.

Для нахождения безразмерных несущей способности и силы трения $L_{\text{тр}}$ получим:

$$R_y = \int_0^{2\pi} p\sin\theta d\theta = \tilde{C}_1\eta\pi + 3\eta\pi(A-N); \qquad (22)$$

$$\tilde{R}_y = \frac{\mu\Omega r_0^2}{\delta^2}\left[\tilde{C}_1\eta\pi + 3\eta\pi(A-N)\right]; \qquad (23)$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{\mu\Omega r_0}{\delta}\left[\int_0^{2\pi}\left(-\frac{\tilde{C}_2}{2h^2}\right)d\theta - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2}+1\right)\int_0^{2\pi}\frac{1}{h}d\theta\right]; \qquad (24)$$

$$\tilde{L}_{\text{тр}} = \frac{L_{\text{тр}}\delta}{2\pi\mu\Omega r_0} = -\frac{\tilde{C}_2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2}+1\right) = \tilde{C}_2\pi - 2\left(\frac{\tilde{C}_1}{2}+1\right)\pi. \qquad (25)$$

Выразим граничные условия на поверхности подшипника в виде рядов по степеням параметра η:

$$u(1+\eta\cos\theta) = u|_{r=1} + \left.\frac{\partial u}{\partial r}\right|_{r=1}\eta\cos\theta + \ldots = 0;$$
$$\mathrm{v}(1+\eta\cos\theta) = u|_{r=1} + \left.\frac{\partial \mathrm{v}}{\partial r}\right|_{r=1}\eta\cos\theta + \ldots = 0. \qquad (26)$$

Асимптотическое решение задачи (7)—(8), будем искать в виде:

$$u = \sum_{k_0}^{\infty} u_k\eta^k;\ \mathrm{v} = \sum_{k_0}^{\infty}\mathrm{v}_k\eta^k;$$
$$p = \sum_{k_0}^{\infty} p_k\eta^k;\ P = \sum_{k_0}^{\infty} P_k\eta^k. \qquad (27)$$

Подставляя выражения (27) в (7) и (8), получим:

$$\frac{\partial R_e}{\partial r} = 0;\ \frac{\partial^2\mathrm{v}_0}{\partial r^2} = -A + N;\ u_0 = 0;$$
$$p_0 = P_0 = \text{const}, \qquad (28)$$

$$\mathrm{v}_0 = 0 \text{ при } r = 1;\ \mathrm{v}_0 = 1 \text{ при } r = 0. \qquad (29)$$

Решение задачи (28)—(29) запишем в виде:

$$\mathrm{v}_0 = (-A+N)\frac{r^2}{2} + (A-N)\frac{r}{2} - r \neq 1. \qquad (30)$$

Для первого приближения перейдем к системе уравнений с граничными условиями:

$$\frac{\partial P_1}{\partial r} = 0,\ \frac{\partial^2\mathrm{v}_1}{\partial r^2} = \frac{dP_1}{d\theta} + R_e\left(u_1\frac{\partial\mathrm{v}_0}{\partial r} + \mathrm{v}_0\frac{\partial\mathrm{v}_1}{\partial\theta}\right);$$

$$\frac{\partial u_1}{\partial r} + \frac{\partial\mathrm{v}_1}{\partial\theta} = 0,\ \frac{\partial^2 P_1}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*}\frac{\partial P_1}{\partial r^*} + \frac{1}{r^*}\frac{\partial^2 P_1}{\partial r^{*2}} = 0;$$

$$v_1|_{r=1} = -\left.\frac{\partial v_0}{\partial r}\right|_{r=1}\cos\theta,\ u_1|_{r=1} = 0;$$

$$\mathrm{v}_1 = 0 \text{ при } r = 0;\ \bar{u}_1 = M\left.\frac{\partial P_1}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}};$$

$$p_1 = P_1|_{r^*=\frac{r_0}{H}};\ \left.\frac{\partial P_1}{\partial r^*}\right|_{r^*=\frac{r_0}{H}-1} = 0;\ p_1(0) = p_1(2\pi) = 0;$$

$$\mathrm{v}_1 = R_1(r)\cos\theta + R_2(r)\sin\theta;$$

$$u_1 = R_3(r)\cos\theta + R_4(r)\sin\theta;$$

$$p_1 = D_1\sin\theta + D_2\cos\theta;$$

$$P_1 = R_5(r^*)\cos\theta + R_6(r^*)\sin\theta. \qquad (31)$$

Осуществим переход к следующей системе уравнений и граничным условиям:

$$\frac{dR_1}{dr^2} = D_1 + R_e\left(R_3(r)\frac{dv_0}{dr} + R_2(r)v_0\right);$$

$$\frac{d^2R_2}{dr^2} = -D_2 + R_e\left(R_4(r)\frac{dv_0}{dr} - R_1(r)v_0\right);$$

$$\frac{dR_3}{\partial r} + R_2 = 0;\ \frac{dR_4}{dr} - R_1 = 0;$$

$$\frac{d^2R_5}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^*}\frac{dR_5}{dr^*} - \frac{R_5}{r^{*2}} = 0;$$

$$\frac{d^2R_6}{\partial r^*} + \frac{1}{r^*}\frac{dR_6}{dr^*} - \frac{R_6}{r^{*2}} = 0; \qquad (32)$$

$$R_1(1) = -\left.\frac{\partial v_0}{\partial r}\right|_{r=1};\ R_2(1) = 0;$$

$$R_3(1) = 0;\ R_4(1) = 0;\ D_1 = R_6\big|_{r^*=\frac{r_0}{H}};$$

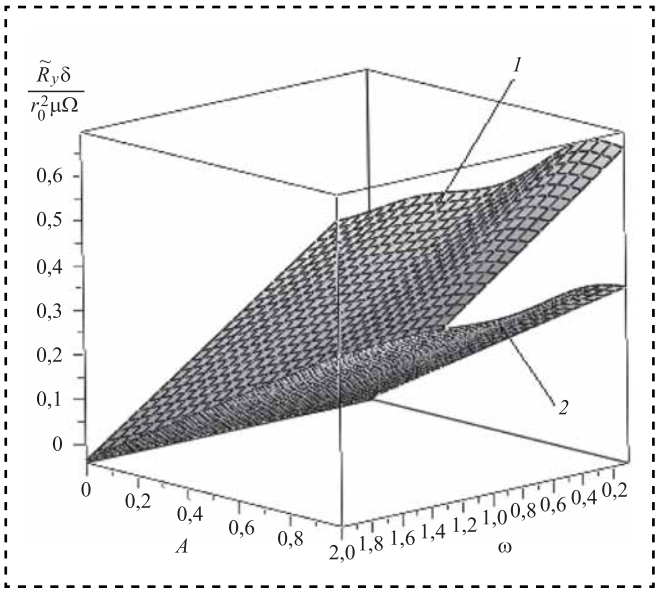


Рис. 1. Зависимость безразмерной несущей способности от величины *A*, характеризующей наличие напряженности электрического поля, и параметра ω без учета сил инерции:
1 — $N = 0{,}3$; *2* — $N = 0{,}4$

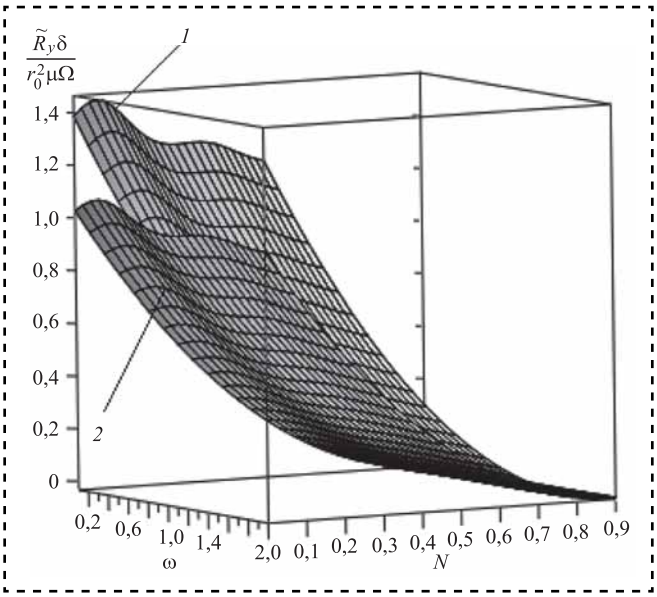


Рис. 2. Зависимость безразмерной несущей способности от значения *N*, характеризующего наличие магнитной индукции, и параметра ω без учета сил инерции:
1 — $A = 0{,}2$; *2* — $A = 0{,}4$

$$D_2 = R_5\big|_{r^*=\frac{r_0}{H}};\ R_5' = 0 \text{ при } r^* = \frac{r_0}{H} - 1;$$

$$R_6' = 0 \text{ при } r^* = \frac{r_0}{H} - 1;$$

$$R_3(0) = MR_5'\big|_{r^*=\frac{r_0}{H}};\ R_4(0) = MR_6'\big|_{r^*=\frac{r_0}{H}}.$$

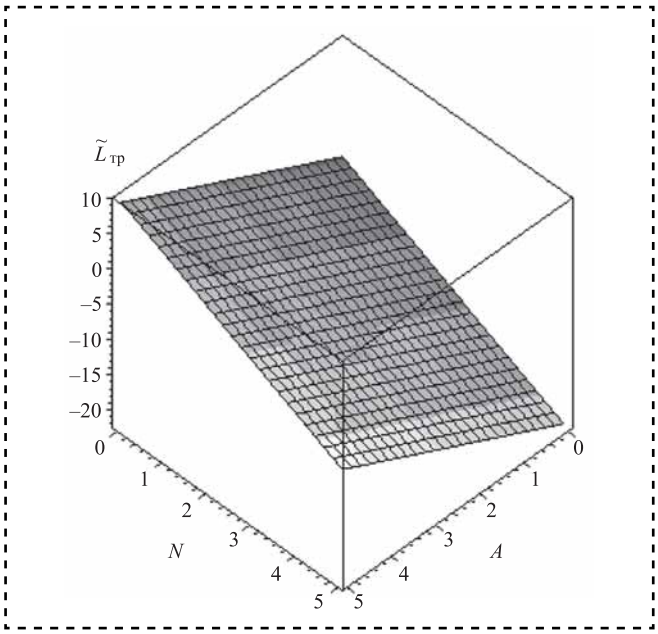


Рис. 3. Зависимость безразмерной силы трения от параметра *N*, характеризующего наличие магнитной индукции, и параметра *A*, характеризующего наличие напряженности электрического поля без учета сил инерции

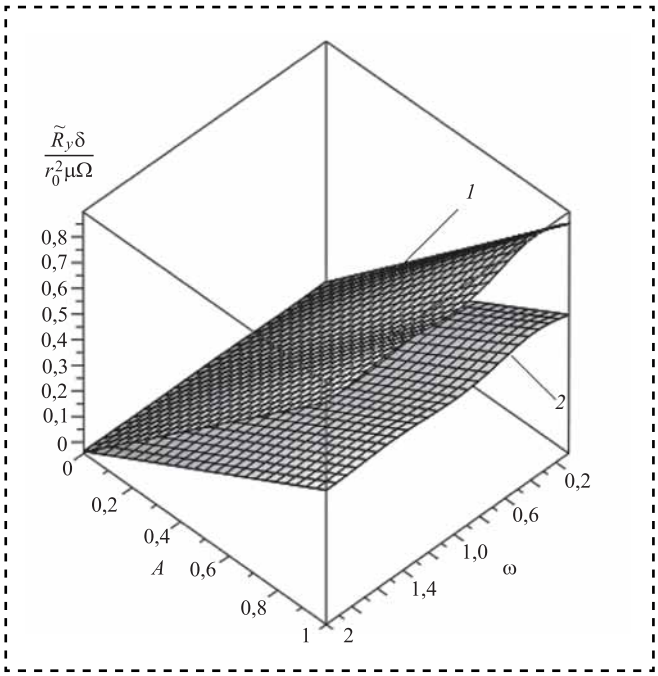


Рис. 4. Зависимость безразмерной несущей способности от параметра *A*, характеризующего наличие напряженности электрического поля, и параметра ω с учетом сил инерции:
1 — Re = 0,97, *N* = 0,3; *2* — Re = 1,02, *N* = 0,3

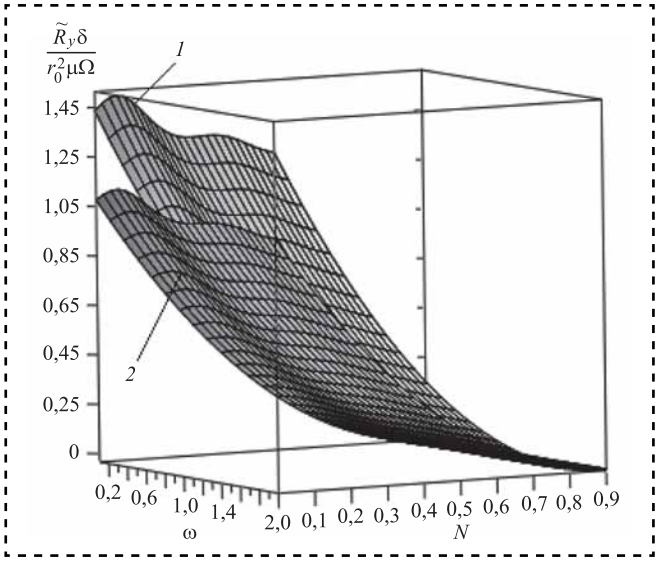


Рис. 5. Зависимость безразмерной несущей способности от параметра *N*, который характеризует наличие магнитной индукции, и параметра ω с учетом сил инерции:
1 — Re = 0,97, *A* = 0,2; *2* — Re = 1,02, *A* = 0,2

Заменяя производные слагаемые конечно-разностным представлением, перейдем к системе алгебраических уравнений, решаемых методом Гаусса—Зейделя при следующих значениях безразмерных параметров:

Re: 0,97; 0,98; 1,02; *N*: 0,3; 0,4; 0,5; *A*: 0,3; 0,4; 0,5; ω: 0,2; 0,5; 1.

Некоторые расчеты численного анализа приведены на рис. 1—5.

Результат численного анализа полученных аналитических зависимостей (23) и (25) для основных рабочих характеристик приведен на рис. 3 и 4.

Выводы

1. При учете сил инерции закономерность влияния напряженности электрического поля на несущую способность остается такой же, как и в случае без учета сил инерции.

2. Установлены области изменения параметров характеристик напряженности электрического поля, обеспечивающие рациональный по несущей способности и силе трения режим работы подшипника.

3. При значении параметра неоднородности, обусловленного наличием пористого слоя, ω = 0,5, наблюдается максимум несущей способности как при учете сил инерции, так и без.

4. При учете сил инерции поддерживающая сила подшипника не перпендикулярна линии центров.

5. При наличии сил инерции несущая способность увеличивается на 5...10 %.

Библиографический список

1. **Воробьев В.Ф., Ильин Н.В., Шипко М.Н.** Повышение коррозионной стойкости постоянных магнитов в устройствах магнитожидкостных уплотнений // Вестник машиностроения, 2002. № 1. С. 20—23.

2. **Михалев Ю.О.** Магнитожидкостные уплотнений // Вестник машиностроения, 2002. № 5. С. 37—45.

3. **Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Александрова Е.Е., Эркенов А.Ч.** Математическая модель стратифицированного течения двухслойной смазочной композиции в радиальном подшипнике с повышенной несущей способностью с учетом теплообмена // Вестник РГУПС, 2011. № 1 (41). С. 160—165.

4. **Гармонина А.Н.** Расчетная модель электропроводящей смазки упорного подшипника с демпфирующими свойствами при наличии электромагнитных полей // Вестник РГУПС. 2015. № 2. С. 146—152.

5. **Гармонина А.Н.** Расчетная модель электропроводящей смазки радиального подшипника с демпфирующими свойствами при наличии электромагнитных полей // Вестник РГУПС. 2015. № 3. С. 121—127.

УДК 863.05.22.10

Е.А. Дубовик *(Ростовский государственный университет путей и сообщений)*
E-mail: dubovik1982@list.ru

Использование анаэробных материалов в трибологии

Приведены сведения о свойствах и технологии восстановления посадочных мест под подшипники качения в отверстиях корпусных деталей анаэробными материалами.

It gives information about the properties and technology of restoration seats under the rolling bearings in the holes of the body parts anaerobic materials.

Ключевые слова: трибология, технология, материал, восстановление, подшипник.

Keywords: tribology technology, material, recovery, bearing.

Неподвижные соединения в автомобилях, тракторах, дорожных и погрузочно-разгрузочных машинах, а также в оборудовании составляют 20...30 % всех сопряжений. При эксплуатации автомобилей происходит нарушение неподвижных посадок цилиндрических соединений типа: "гнездо шарикоподшипника—шарикоподшипник", "вал—шарикоподшипник", "вал—шестерня", "корпус—втулка" и т.д., что влечет проворачивание одной из сопрягаемых деталей относительно другой. Основная причина отказа неподвижных соединений — износ сопрягаемых поверхностей. До 30 % валов и 50...80 % корпусных деталей машин и оборудования, поступающих на капитальный ремонт, требует восстановления посадочных мест под подшипники качения. Основной причиной ускоренного износа сопрягаемых поверхностей деталей является фреттинг-коррозия, возникающая при колебательном относительном движении контактирующих поверхностей. Это движение может быть вызвано вибрациями, возвратно-поступательным перемещением, периодическим изгибом или скручиванием сопряженных деталей и т.п.

Традиционные методы восстановления неподвижных соединений, такие как хромирование, осталивание, электродуговая и вибродуговая наплавки, накатка, накатка с заполнителем, приварка стальной ленты, металлизация, железнение и другие не в полной мере обеспечивают требуемые характеристики ремонтируемых сопряжений. Общий недостаток традиционных методов состоит в искажении геометрии восстановленной поверхности, неточностях сборки, напряженности посадки, погрешностях, обусловленных технологией сборки. Особенно отрицательно это влияет на качество сборки механизмов зубчатых передач (коробок передач, задних мостов, раздаточных коробок и т.п.). В результате деформируется наружное кольцо подшипника и искажается траектория его беговой дорожки.

Восстановление сопрягаемых поверхностей с помощью анаэробных материалов позволяет снизить трудоемкость процессов по сравнению с традиционными методами в 5...30 раз, сократить расход материалов в 70...260 раз, сэкономить около 240 кВт·ч электроэнергии при восстановлении 1 м^2 поверхности детали. При этом отпадает необходимость в механической обработке детали. Благодаря высокой проникающей способности анаэробные материалы плотно заполняют трещины, микродефекты сварных швов, зазоры.

Этот процесс включает следующие операции:

— очистку и мойку сопрягаемых деталей;

— деффектовку и разбивку деталей на группы, в зависимости от величины износа (зазора в соединении);

— доставку на сборочный участок;

— подготовку посадочных мест (зачистка и обезжиривание поверхности изделия);

— выбор и подготовку анаэробного материала и композиций на его основе;

— нанесение анаэробного материала;

— сборку узла, агрегата (полная сборка агрегата, узла с сопряжением должна проводиться сразу после нанесения анаэробного материала на поверхность).

Очистку, мойку и обезжиривание проводят традиционными способами, получившими применение в ремонтном производстве. При сборке детали центрируют с помощью оправок и приспособлений. Собранное соединение выдерживают в неподвижном состоянии при комнатной температуре 30...40 мин, после чего анаэробный материал набирает технологическую прочность, и с ремонтируемого узла можно снимать центрирующее приспособление. По истечении 5...24 ч герметик набирает рабочую прочность.

Износ сопряжений определяется на основе проведенных измерений, при этом могут учитываться данные ремонтных предприятий.

Таблица 1

Допустимые зазоры применения составов на основе анаэробных герметиков

Массовая доля компонентов, %	Допустимый зазор, мм
Порошок железный ПЖ очень мелкий (ВМ) или мелкий (М) — 15; анаэробный герметик — остальное	0,15...0,3
Пудра бронзовая или порошок медный — 15; порошок полиэтилена мелкодисперсный — 30; герметик — остальное	0,15...0,5
Тальк — 25; ПЖ (М) — 5; герметик — остальное	0,5...1,0
Графит — 25; пудра бронзовая или ПЖ (М), или порошок медный — 0,1; герметик — остальное	0,5...1,0
Пудра алюминиевая — 25; пудра бронзовая или ПЖ (М) — 0,1; герметик — остальное	0,5...1,0
Порошок медный — 15; герметик — остальное	0,15...0,5

С увеличением толщины слоя герметика его долговечность снижается. Для повышения прочности и расширения технологических возможностей в герметики добавляют наполнители, при этом, допустимые зазоры для различных композиций приведены в табл. 1.

По реальному зазору подбирают марку анаэробного материала с учетом его вязкости:

Вязкость, 10^{-6} м^2/с	5...20	50...150	150...500	1000...3000	3000...5000	5000...300 000	Свыше 300 000
Зазор, мм	До 0,07	0,05...0,15	0,1...0,2	0,15...0,35	0,2...0,45	0,25...0,6	0,6...1,0

Вязкость анаэробного материала в исходном состоянии уменьшается в 5...6 раз в зависимости от температуры окружающей среды. Этот температурный "разброс" вязкости необходимо учитывать при использовании анаэробных материалов. Высоковязкий анаэробный материал трудно равномерно распределить в малом зазоре, а низковязкий не будет удерживаться в большом зазоре и вытечет до момента отверждения.

По рекомендуемой вязкости подбирается анаэробный материал. Физико-химические свойства некоторых анаэробных материалов представлены в табл. 2.

В настоящее время промышленностью предлагается целый ряд добавок к анаэробным материалам существенно расширяющих диапазон их применения. Так как анаэробный материал является готовым продуктом, который наносится непосредственно на деталь, то при его применении большое внимание следует уделять подготовке восстанавливаемых поверхностей. Подготовка поверхности включает тщательную очистку, удаление окалины и ржавчины механическим путем. Масляные и другие загрязнения удаляют с помощью растворителей: ацетона, эфира, бензина, фреона, хлорсодержащих растворителей. Для обезжиривания поверхности ее протирают смоченным в растворителе тампоном, промывают с помощью кисти, окунанием или заливкой.

Окалину удаляют абразивной шкуркой, металлическими кругами, лепестковыми абразивными кругами, закрепленными в ручных электрических либо пневматических машинах. Детали после гальванического покрытия герметизируют без предварительного обезжиривания.

Анаэробный материал наносят на поверхность одной из двух сопрягаемых деталей непосредственно через капельницу флакона, в котором он поставляется заводом-изготовителем, либо с помощью шпателя, кисти с коротким ворсом после полного испарения растворителя. Композицию готовят непосредственно перед использованием. Анаэробный материал наносят на всю наружную цилиндрическую поверхность, а затем медленно вдвигают или вклеивают одну деталь в другую.

Эффективный и несложный способ восстановления посадочных отверстий под подшипни-

Таблица 2

Физико-химические свойства анаэробных материалов

Показатель	ДН-1	ДН-2	Анатерм-18	Анатерм-8	Анатерм-6К	Унитерм-8
Внешний вид	Прозрачная однородная жидкость					
Цвет	Светло-желтый		Синий		Красный	Зеленый
Климатическая вязкость при 20 °С, 10^{-6} м^2/с	100...150	1000...3000	4000...6000	15 000...30 000	5000...30 000	6000...25 000
Плотность, кг/м^3	1060	1116	1120	1140	1200	1220
Предел прочности на сдвиг при отвинчивании, МПа, после прогрева:						
при 150 °С в течение 1000 ч	10...14	6...10	2...4	2...8	10...14	9...12
при 250 °С в течение 5 ч	12...15	6...9	2...4	2...8	10...14	8...10
Температурный диапазон эксплуатации, °С	−60...150		−60...100		−96...250	−60...150
Предел прочности при сдвиге, МПа	6...12	4...10	1...3		6...10	12...14

ки в корпусных деталях — это калибрование поверхности анаэробных композиций. Его сущность состоит в том, что на изношенную поверхность детали наносят слой анаэробной композиции, который после предварительного частичного отверждения калибруют, исключая, таким образом, расточку восстановленных отверстий. Технологический процесс включает операции: очистку поверхности посадочного отверстия, обезжиривание, приготовление композиции, нанесение слоя композиции толщиной 1...1,5 мм на подготовленную поверхность, частичное отверждение, калибрование, окончательное отверждение композиции, снятие наплывов, контроль качества покрытий. Таким способом восстанавливают посадочные отверстия подшипников в корпусах водяного насоса, коробок передач, раздаточных коробок, в крышках распределительных шестерен двигателей и т.д.

Для прогнозирования достигаемой прочности анаэробных соединений можно использовать следующую методику.

Силу выпрессовки (осевую нагрузку) и крутящий момент (радиальную силу), определяют по зависимостям:

$$F = \pi\tau_{\beta 2} dlk_{\text{попр}}; \quad (1)$$

$$M_t = \frac{\pi\tau_{\beta 2} d^2 lk_{\text{попр}}}{2}, \quad (2)$$

где F — сила выпрессовки; M_t — крутящий момент; d — средний диаметр посадки; l — длина соединения; $\tau_{\beta 2}$ _ предел прочности при аксиальном сдвиге; $k_{\text{попр}}$ — поправочный коэффициент, представляющий собой произведение ряда коэффициентов:

$$k_{\text{попр}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 \cdot k_8, \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8 — коэффициенты, учитывающие соответственно материал субстрата, зазор, шероховатость поверхности, площадь контакта сопрягаемых поверхностей и масштабный фактор, направление нагрузки, способ нагружения, температуру эксплуатации, способ отверждения.

В зависимости от материала поверхности принимают понижающий коэффициент k_1, который учитывает влияние материала на отверждение и адгезионную прочность. Для стали $k_1 = 1$; алюминия $k_1 = 0{,}7$; высоколегированной стали $k_1 = 0{,}8$; материалов с гальваническими поверхностями $k_1 = 0{,}5$; меди $k_1 = 0{,}5$; серого чугуна $k_1 = 0{,}4$; пластмассы $k_1 = 0{,}2...0{,}4$. При соединении разнородных материалов принимают наименьшее значение k_1.

Далее приведены зависимости коэффициентов k_2 и k_3 от зазора и шероховатости сопрягаемых поверхностей:

Зазор, мм	0,05	0,1	0,2	0,3
k_2	1	0,9	0,8	0,5
Шероховатость, мкм	0	10	20	30
k_3	1	1,1	1,4	1,6

Коэффициент k_5 для анаэробных материалов лежит в пределах $k_5 = 0{,}4...0{,}8$.

Кроме направления нагрузки необходимо учитывать и способ нагружения. С этой целью вводится коэффициент k_6, который имеет следующие значения:

При статической нагрузке. 1
При легкой знакопеременной нагрузке. 0,7
При переменной пульсирующей нагрузке 0,5
При высокой длительной переменной нагрузке . . 0,7

В зависимости от температуры эксплуатации прочность соединения изменяется. Наибольшая прочность достигается при температуре 20...25 °С. Ориентировочно, в зависимости от температуры, коэффициент k_7 можно принимать:

— при 20...50 °С $k_7 = 1$; при 60...100 °С $k_7 = 0{,}9$; при 120...200 °С $k_7 = 0{,}85$.

Прочность анаэробного соединения зависит от способа отверждения, что учитывается с помощью коэффициента k_8:

Отверждение при комнатной температуре
20...25 °С 1
Отверждение при нагреве до 120 °С 1,2
Отверждение при помощи активатора 0,8

Запас прочности соединения с анаэробным материалом при осевой V_a и радиальной V_t, нагрузках определяется по зависимостям:

$$V_a = \frac{F}{F_{\text{треб}}}; \quad (4)$$

$$V_t = \frac{M_t}{M_{\text{треб}}}, \quad (5)$$

где F и M_t — расчетные значения; $F_{\text{треб}}$; $M_{\text{треб}}$ — необходимые значения для обеспечения работоспособности соединения.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 29.12.2015. Подписано в печать 01.03.2016. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.