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

6 2008 (95)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Самсонов О.С., Сосунов Д.В., Толстопятов И.И., Шенаев М.О. Проектирование технологии сборки изделий авиационной техники в цифровой информационно-программной среде . . . 3

Виноградов В.М., Шандров Б.В. Особенности сборки и контроля сложного зуборезного инструмента для обработки зубчатых колес автомобильных трансмиссий . . . 12

Аввакумов В.Д. Методы расчета массово-геометрических характеристик 3D-мерных объектов и сборок с учетом разброса размеров в поле допуска. *Продолжение* . . . 17

Толоконников С.В., Журавлев А.Н. Упорядоченная сборка опор скольжения буровых шарошечных долот . . . 24

Сборочное оборудование и его элементы

Тарабарин В.Б. Промышленные роботы и манипуляторы. *Продолжение* . . . 30

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Кутузов В.К., Воронов С.А., Сергеев Ю.В. Исследование влияния режимов нагружения аксиально-поршневых гидромашин на продолжительность их испытаний . . . 38

Кузин Ю.Б., Куменко А.И., Зиле А.З. Запуск в эксплуатацию системы удаленного доступа ОАО "ОГК–5" к системе АСКВМД ОАО "ВТИ" на базе аппаратуры НТЦ "Виконт" и ЗАО "Энергоприбор" . . . 42

Разборка

Шуваев В.Г., Шуваев И.В. Повышение эффективности разборки резьбовых соединений с применением ультразвуковых колебаний . . . 45

В порядке обсуждения

Григорьев В.С. Ресурсные цепи и аксиоматика их описания . . . 47

Нормативная документация

Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения (по материалам ГОСТ 22061–76). *Продолжение* . . . 53

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.: (495) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (495) 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.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА
В.М. БЕДРИН
А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор)
А.А. ГУСЕВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ
И.Н. ЖЕСТКОВА (зам. главного редактора)
Ю.Л. ИВАНОВ
Ю.Г. КОЗЫРЕВ
А.И. КУМЕНКО
А.В. МЕДАРЬ
Е.А. МИКРИН
Ю.Ф. НАЗАРОВ
В.В. ПОРОШИН
О.Н. РУМЯНЦЕВА
Б.В. ШАНДРОВ
А.А. ШАТИЛОВ
А.Г. ХОЛОДКОВА
Г.А. ЯРКОВ

Региональные редсоветы

АСТРАХАНЬ
В.В. МИКИТЯНСКИЙ
БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО
БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО
ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН
А.А. СУПОНЯ
В.М. КОРНИЕНКО
ВОЛГОГРАД
В.Г. КАРАБАНЬ
М.Г. КРИСТАЛЬ
В.И. ЛЫСАК
В.М. ТРУХАНОВ
ИЖЕВСК
И.В. АБРАМОВ
Б.А. ЯКИМОВИЧ
В.Г. ОСЕТРОВ
И.К. ПИЧУГИН
КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ
КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ
КОЛОМНА
Ю.Д. АМИРОВ
КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН
В.И. ШПОРТ
А.М. ШПИЛЕВ
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ
С.В. ДМИТРИЕВ
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ
ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ
ОРЕЛ
Ю.С. СТЕПАНОВ
Г.А. ХАРЛАМОВ
ОРЕНБУРГ
А.Н. ПОЛЯКОВ
А.И. СЕРДЮК
А.П. ФОТ
РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
В.В. НЕПОМИЛУЕВ
А.Н. СЕМЕНОВ
САМАРА
М.В. ЕВДОКИМОВ
Ю.А. ВАШУКОВ
Г.А. КУЛАКОВ
В.А. НИКОЛАЕВ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.Ф. КУЗЬМИН
Е.В. ШАЛОБАЕВ
ТОЛЬЯТТИ
А.И. РЫЖКОВ
Б.Ф. ХАЗОВ
ХАБАРОВСК
В.А. ЛАШКО

Украина
КИЕВ
А.С. ЗЕНКИН
В.А. МАТВИЕНКО
ДОНЕЦК
А.И. МИХАЙЛОВ
СЕВАСТОПОЛЬ
Е.Л. ПЕРВУХИНА
ХАРЬКОВ
Б.М. АРПЕНТЬЕВ

Беларусь
МИНСК
В.Л. БАСИНЮК
ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ
ПОЛОЦК
М.Л. ХЕЙФЕЦ

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
Н.М. КУЩ-ЖАРКО, О.Н. ЛУТОВИНИНА, Л.В. САВЕЛЬЕВА

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

© Издательство “Машиностроение”, “Сборка в машиностроении, приборостроении”, 2008

THE MONTHLY NEWSMAGAZINE FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

6 2008 (95)

CONTENTS

Modern Technologies in Assembly

Samsonov O.S., Sosunov D.V., Tolstopiatov I.I., Shenaev M.O. Projection of assembly technique of aeronautical engineering production in digital data-processing medium . . . 3

Vinogradov V.M., Shandrov B.V. Distinctons of assembling and controlling of the composite tooth cutting tool for cut teeth of gears automobile transmissions . . . 12

Avvakumov V.D. Methods of calculation mass-geometry features of 3D-measured objects and assemblies taking into consideration the size range in the field of the tolerance. *A prolongation* . . . 17

Tolokonnikov S.V., Zhuravlev A.N. Ordered assembly of cone rock bit slide bearings . . . 24

Production Tools and Machinery for Assembly

Tarabarin V.B. Industrial robots and manipulators. *A prolongation* . . . 30

Quality Assurance. Testing. Monitoring

Kutuzov V.K., Voronov S.A., Sergeev Y.V. Research of influence of modes loading of axial-piston hydromachines on duration of their tests . . . 38

Kuzin Y.B., Kumenko A.I., Zile A.Z. Putting into operation remote access system OAO "OGK–5" to ASKVMD OAO "VTI" system based on NTC "Vikont" and ZAO "Energopribor" technology . . . 42

The Dismantling

Shuvaev V.G., Shuvaev I.V. Raise of efficiency of disassembly of threaded connections with application of ultrasonic oscillations . . . 45

Discussing

Grigorjev V.S. Resort chains and axiomatic of their description . . . 47

Command Papers

Machines and technological equipment balance quality grade system. General (on the GOST 22061–76). *A prolongation* . . . 53

Journal is distributed on subscription, which can be issued 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.: (495) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (495) 269-48-97.

http://www.mashin.ru

E-mail: sborka@mashin.ru

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

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

Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

Editors

MOSCOW

BEDRIN V.M.
VASIL'EV A.S. (Chief editor)
DALSKY A.M.
GUSEV A.A.
ZHESTKOVA I.N. (Deputy chief editor)
IVANOV YU.L.
KOZYREV YU.G.
KUMENKO A.I.
MEDAR' A.V.
MIKRIN E.A.
NAZAROV Yu.F.
POROSHIN V.V.
RUMIANTSEVA O.N.
SHANDROV B.V.
SHATILOV A.A.
KHOLODKOVA A.G.
YARKOV G.A.

Regional editors

ASTRACHAN
MIKITIANSKI V.V.

BELGOROD
PELIPENKO N.A.

BRIANSK
GORLENKO O.A.

VLADIVOSTOK
KULSHIN Yu.N.
SUPONIA A.A.
KORNIENKO V.M.

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

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

KAZAN
ADGAMOV R.I.

KOVROV
ZHITNIKOV Yu.Z.

KOLOMNA
AMIROV Yu.D.

KOMSOMOLSK-ON-AMUR
MARJIN B.N.
SCHPORT V.I.
SHPILEV A.M.

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

OMSK
KOSTIUKOV V.N.

OREL
STEPANOV Yu.S.
KHARLAMOV G.A.

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

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

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

ST.-PETERSBURG
KUZMIN V.F.
SHALOBAEV E.V.

TOLIATI
KHAZOV B.F.
RYZHKOV A.I.

KHABAROVSK
LASHKO V.A.

Ukraine

KIEV
ZENKIN A.S.
MATVIENKO V.A.

DONETSK
MIKHAILOV A.I.

SEVASTOPOL
PERVUKHINA E.L.

KHARKOV
ARPENTIEV B.M.

Belarus

MINSK
BASINJUK V.L.

GOMEL
STARZHINSKI V.E.

POLOTSK
KHEIFETZ M.L.

Executive editors of current issue:
KUSH-ZHARKO N.M., LUTOVININA O.N., SAVELIEVA L.V.

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2008

О.С. Самсонов, *канд. техн. наук,* **Д.В. Сосунов, И.И. Толстопятов, М.О. Шенаев** *("МАТИ" – РГТУ им. К.Э. Циолковского)*

Проектирование технологии сборки изделий авиационной техники в цифровой информационно-программной среде

Рассмотрены вопросы проектирования сборки изделий авиационной техники в цифровой среде на принципах CALS-технологий.

In article are considered questions of the assembling designing of aeronautical engineering production in the cyberspace based on CALS principles.

1. Цифровые информационные технологии в реализации проектов создания авиационной техники

1.1. Проблемы внедрения информационных технологий для решения задач подготовки производства

Для обеспечения конкурентоспособности изделий авиационной техники (АТ) реализация проектов их создания должна осуществляется на основе современных цифровых технологий проектирования и производства, базируемых на концепции CALS. В основе информационной поддержки процессов жизненного цикла изделия лежит интегрированная информационная модель, объединяющая комплексы моделей, формируемых и используемых на различных этапах проекта.

За последние годы ведущие авиационные КБ и заводы накопили большой опыт решения задач геометрического моделирования конструкции и создания электронных моделей изделия. Появление и ввод в действие новых стандартов ЕСКД [1, 2] и корректировка действующих стандартов под представление технической информации в электронном виде создали необходимую нормативную базу для использования электронных моделей в качестве основных информационных объектов электронной конструкторской документации. В новых стандартах ЕСКД модельный подход регламентирован, т.е. электронная модель изделия определена как первичный электронный документ, а чертежи – вторичные документы, получаемые на основе электронной модели.

В области автоматизации технологического проектирования и решения задач подготовки производства существует значительное отставание, что объясняется целым рядом объективных причин. Положение дел в области информационных технологий во многом обусловлено негативным влиянием тяжелого периода 90-х годов прошлого века практически на все направления деятельности научно-промышленного комплекса, в том числе на разработку отечественных систем автоматизированного проектирования.

Отсутствие государственного финансирования, свертывание программ исследований в области создания автоматизированных систем, неправильное определение приоритетов финансирования и ряд других стратегических ошибок привели к тому, что в настоящий момент на рынке программного обеспечения доминируют зарубежные разработчики автоматизированных систем.

Ведущие КБ и заводы частично оснащены и продолжают оснащаться импортными CAD/CAM /CAE/PDM/ERP системами. Это приводит к большим финансовым затратам на приобретение и техническое сопровождение программного обеспечения и длительным срокам адаптации на российских предприятиях, несет в себе риск информационной безопасности, а также обеспечивает гарантированное отставание в данной области. Создание отечественных импортодополняющих и импортозамещающих автоматизированных систем, в том числе технологического проектирования, является актуальной задачей.

Необходимость создания технологического блока в комплексе автоматизированных систем, осуществляющих информационную поддержку жизненного цикла изделия, особенно остро стала проявляться в последнее время. При постановке на производство изделий АТ на основе электронных моделей необходимо располагать программным обеспечением и информационными базами для проектирования технологических процессов и оснастки по всем технологическим переделам. Из всего комплекса систем технологического проектирования наиболее освоенными и внедренными являются модули по разработке управляющих программ для оборудования с ЧПУ.

По другим видам процессов обычно используют локальные системы, функционирующие в режиме "технологического редактора", позволяющие в диалоговом режиме формировать из отдельных элементов фразы технологических процессов. Но такие системы не обеспечивают интеллектуальной поддержки процессов проектирования и взаимодействия с электронной моделью изделия, поэтому не соответствуют современным требованиям как по функциональным, так и по интеграционным возможностям.

Для решении задач технологического проектирования в среде цифровых технологий необходимо регламентировать использование модельного подхода, т.е. модель технологического процесса, спроектированная в автоматизированной системе, должна стать основным электронным документом, а комплект технологической документации (маршрутные и операционные карты, ведомости, эскизы и т.д.) формироваться в системе на основании модели технологического процесса. Однако в терминологическом словаре по CALS-технологиям и в новых стандартах ЕСКД модельный подход к решению задач технологического проектирования не декларирован.

В ряде нормативных документов предприятий регламентируется перевод бумажной технологической документации (ТД) и документации контроля в электронную форму. Такая задача является чисто технической, не представляет сложности при современном уровне развития вычислительной техники, но не решает главной проблемы – *организации технологического проектирования и сопровождение изделия на базе интегрированной информационной модели.*

Проектирование технологии сборочно-монтажных работ является одной из ключевых задач технологического проектирования. Трудоемкость проектирования технологии сборки АТ очень высока, а принимаемые решения оказывают определяющее влияние на качество изделий и технико-экономические показатели проекта.

Сборка существенно влияет на другие виды производств, поставляющих комплектующие, средства технологического оснащения, а также на организацию всего производственного процесса изделия. Цикловые графики сборки являются организационным стержнем, на который замкнуты графики работ по другим видам производств. Они являются основой предварительного планирования и технико-экономического анализа проекта при постановке на производство новых изделий, а также для оперативно-календарного планирования, управления, материально-технического обеспечения производства, в том числе по работе с внешними поставщиками комплектующих.

Анализ программных продуктов, появившихся на российском рынке за последнее время, показывает, что поставщики импортных CAD/CAM-систем не предлагают конечного программного продукта, адаптированного к эксплуатации на российских промышленных предприятиях. Предлагаемый ими инструментарий для создания технологических приложений по сборке является дорогостоящим программным продуктом. Его освоение, информационная настройка и практическое применение может потребовать не меньше средств и ресурсов, чем приобретение, освоение и внедрение в реальную инженерную практику базовой CAD-системы (порядка десяти лет).

Маркетинговые исследования, проведенные несколько лет назад, позволили спрогнозировать возникновение данной ситуации и принять решение о создании комплекса прикладных систем технологического проектирования по различным видам производств, в котором ключевая роль отведена системе автоматизированного проектирования технологических процессов сборочно-монтажных работ. Разработка системы ТЕМП (Технологическое Моделирование Процессов) осуществляют специалисты авиационной промышленности и высшей школы.

1.2. Научно-методический базис автоматизации проектирования технологических процессов сборки

В основе системы были положены научно-методические разработки и практический задел по автоматизации технологического проектирования, созданные еще в советское время:

• система математического моделирования объектов машиностроения ИСТРА ("Иерархическая Система Трансляции"). Описание объектов и процессов различной физической природы осуществляют в системе ИСТРА с использованием регламентированных методов и уровней моделирования; понятие контура (F) как совокупности свойств объекта используют для построения логических моделей регламентированных классов (конъюнктивные и дизъюнктивные модели); введено понятие технологического оператора (τ), как элемента технологического процесса (T), воздействие которого на изделие (A) преобразует его

структуру, свойства и параметры; регламентировано применение типовых математических моделей и унифицированных алгоритмов их обработки для формализованного описания широкого спектра задач конструкторско-технологического проектирования. Применение данного метода обеспечено руководящими документами, государственными стандартами и методическими материалами [3];

• методология системно-структурного анализа и метод многоуровневого итерационного проектирования технологических процессов, в соответствии с которой модель технологического процесса представляют в виде иерархической структуры, каждый элемент которой описывают совокупностью функциональных и структурных свойств и отношений. Нижний уровень соответствует описанию элементарных объектов, структура которых не раскрыта;

• методика моделирования, проектирования и оптимизации технологических процессов сборки, описывающая связи между конструкцией, технологией и организацией сборочного производства, а также формирования цикловых графиков сборки и их использование в виде динамических документов оперативного управления [5];

• результаты работ по созданию отраслевой технологической информационной базы, полученные на основе структуризации и типизации элементов технологического процесса и реализации модульного принципа формирования информационного обеспечения.

В автоматизированных системах, реализованных с использованием указанных методик в условиях бумажного документооборота, при описании конструктивно-технологических свойств изделий задавали геометрические свойства и параметры с применением классификаторов (например, форма внешних обводов сборочной единицы – плоская, одинарной или двойной кривизны; толщина пакета, диаметр заклепки, шаг заклепочного шва и т.д.).

Переход на цифровые технологии и электронное макетирование создает принципиально новые возможности для разработки автоматизированных интеллектуальных систем конструкторско-технологического проектирования. Электронный макет, являясь математическим объектом, пригоден для решения задач по его анализу для автоматизированного формирования структуры и параметров технологических объектов под различные классификационные схемы, используемые в системах технологического проектирования.

Для создания систем технологического проектирования, соответствующих требованиям CALS-технологий, был выполнен комплекс исследований, направленных на объединение ранее разработанных методов структурно-параметрического моделирования с современными методами геометрического моделирования. Методики проектирования были адаптированы с учетом развития информационных систем (переход авиационной промышленности на цифровое электронное моделирование и бесплазовую подготовку производства) и реализованы в новой программно-технической среде [6, 7].

В системе ТЕМП заложены и реализованы следующие базовые решения.

1. Информационная поддержка технологического проектирования на различных этапах реализации проекта, начиная с эскизного проекта до технологического сопровождения на этапах производства и эксплуатации. Для этого в *системе* реализованы механизмы многоуровнего моделирования технологических процессов, позволяющие реализовать вариантное проектирование технологии сборки.

2. Использование конструкторского электронного макета (ЭМ) изделия в качестве исходных данных для проектирования технологических процессов и средств технологического оснащения. Для этого в *системе* используют программные средства, позволяющие конвертировать конструкторские электронные макеты изделия из базовых CAD-систем в среду ТЕМП, а также передавать необходимую атрибутику из PDM-системы. В настоящее время в системе реализованы конвертеры электронных макетов из CAD-систем Unigraphics, CATIA.

3. Формирование в среде ТЕМП технологических электронных макетов (ТЭМ) изделий и их использование для моделирования и визуализации технологических процессов. Анимационные модели производственных процессов, формируемых в системе, отражают реальные технологические закономерности, описанные в технологической базе знаний (в алгоритмах и моделях технологического проектирования). Средства *системы* реализуют технологическое управление геометрией и взаимосвязи между структурной, параметрической и геометрической моделями процессов.

4. Разработка и использование интегрированной информационной среды конструкторско-технологического проектирования, включающей описание элементов производственной системы и моделей проектирования технологических операций по всем видам сборочных работ (несколько сотен

информационных моделей). Разработка информационных моделей (базовых и комплексных технологических модулей) осуществляется на основе нормативно-технической документации (НТД) (производственных инструкций, стандартов, технологических указаний и т.д.) на специальном языке описания технологических знаний. При поставке *системы* базовая информационная среда адаптирована под НТД заказчика.

5. Реализация в системе нескольких методов проектирования. Проектирование "с нуля", когда отсутствует прототип технологического процесса и пользователь формирует его в автоматизированном режиме, выбирая виды объектов, виды работ и проектируя содержание операций и переходов, используя каскадные меню. Проектирование "по аналогу", когда после установления соответствий между новым изделием и изделием-аналогом *система* реализует автоматическое проектирование всего технологического процесса или его отдельных фрагментов, что позволяет значительно повысить скорость проектирования.

6. Формирование технологической документации с учетом конфигурации изделий. Данная функция вызвана особенностью реализации новых проектов авиационной техники, предусматривающих, помимо базовой конструкции, создание различных модификаций и вариантов исполнения изделий. Поэтому требуется управлять конфигурацией конструкторской и технологической документации под каждый серийный борт изделия в соответствии с требованиями конкретного заказчика, рассчитывать его стоимость и управлять процессами комплектации в ходе его производства и эксплуатации.

2. Моделирование объектов и процессов сборки в цифровой информационно-программной среде

Общая схема проектирования технологического процесса сборки, полученная на основании детализации базовой формулы параллельного проектирования [8, 9]:

$$S(A_{\text{I}}^{\text{т}})\rho_{\text{I}}^{\text{т}A}S^{\text{п}}(T_{\text{I}}^{A}) \rightarrow S^{\text{р}}(T_{\text{I}}^{A}), \qquad (1)$$

где $S(A_{\text{I}}^{\text{т}})$ – технологическая модель сборочной единицы, исходное описание изделия;

$S^{\text{п}}(T_{\text{I}}^{A})$ – модель проектирования технологического процесса, сформированная из элементов порождающей среды технологического проектирования;

$S^{\text{р}}(T_{\text{I}}^{A})$ – модель технологического процесса – результат реализации преобразования;

$\rho_{\text{I}}^{\text{т}A}$ – процедурно-алгоритмическая среда технологического проектирования.

Эта схема описывает процесс получения проектного решения – модели технологического процесса $S^{\text{р}}(T_{\text{I}}^{A})$ на основании исходного описания технологической модели сборочной единицы $S(A_{\text{I}}^{\text{т}})$. Здесь используют модель проектирования технологического процесса $S^{\text{п}}(T_{\text{I}}^{A})$, синтез которой из элементов порождающей среды $S^{\text{п}}(T^{A})$ и ее обработка (выбор варианта решения, расчеты, моделирование, визуализация и т.д.) реализуют процедурно-алгоритмической средой автоматизированной системы технологического проектирования.

2.1. Технологические модели изделий

Состав технологических моделей изделия должен соответствовать структуре процесса его производства, поэтому выделяют два основных класса технологических моделей:

- модели деталей, описывающие их состояния в процессах изготовления;
- модели сборочных единиц, описывающие состояния сборочной единицы (СЕ) в ходе технологических процессов сборки.

Сборка, являясь частью производственного процесса, сама является сложным многоуровневым процессом, который обычно описывают схемой сборки. В самолетостроении выделяют уровни узловой, агрегатной и общей сборки. Схему сборки разрабатывают на основании схемы конструктивно-технологического членения, определяют состав технологических подсборок и последовательность их формирования.

Технологическая электронная структура изделия (ТЭСИ) описывает состав технологических подсборок разных уровней и представляется в виде графа – дерева. Иерархические связи являются внешними связями технологических сборочных единиц, а связи между составными частями сборочной единицы являются ее внутренними структурными связями.

Технологические модели СЕ должны иметь одинаковую структуру описания на любом уровне иерархии:

$$S(A_{\text{I}}^{\text{т}}) = \{S^{S}(A_{\text{I}}^{\text{т}}),\ S^{N}(A_{\text{I}}^{\text{т}}),\ S^{\text{г}}(A_{\text{I}}^{\text{т}})\}, \qquad (2)$$

где $S^{S}(A_{\text{I}}^{\text{т}})$ – структурная модель ТЭСИ;

$S^N(A_I^т)$ – параметрическая технологическая модель изделия;

$S^г(A_I^т)$ – геометрическая технологическая модель изделия.

Внутреннюю структуру сборочной единицы обычно описывают графом

$$G(A, C),$$

где A – множество вершин графа составных частей;

C – множество дуг графа соединений – механических связей между составными частями.

Поэтому при разработке технологической модели СЕ целесообразно рассматривать два этих класса объектов и связи между ними:

$$S(A_I^т) = \{S(A_i^C),\ S(C_i^A),\ R_i^{AC}\}, \qquad (3)$$

где $S(A_i^C)$ – модель составных частей СЕ;

$S(C_i^A)$ – модель соединений СЕ;

R_i^{AC} – взаимосвязи между частями моделей и соединений.

Структурными элементами модели $S(A_i^C)$ являются: детали, технологические подсборки нижних уровней (условно монолитные элементы), материалы (герметики, теплозащитные покрытия и т.д.), а также элементы технологической оснастки, участвующие в технологическом процессе (макетные элементы, целевые знаки, заглушки, крышки и т.д.).

Структурными элементами модели $S(C_i^A)$ являются: крепежные точки и соединительные швы.

Под крепежной точкой будем понимать механическую связь, включающую в себя соединительный элемент (монолитный или сборный), и сопрягаемые с ним поверхности составных частей. В состав крепежной точки могут входить материалы в виде клеевых пленок и зон герметизации.

Под соединительным швом (заклепочным, болтовым и т.д.) будем понимать совокупность крепежных точек, объединенных по общности конструктивно-технологических свойств (состав деталей пакета, типоразмер соединительных элементов, метод выполнения соединения). В состав модели соединения может включаться технологический крепеж, устанавливаемый и снимаемый в ходе технологического процесса.

Введение материала в структуру электронного макета вызвано тем, что герметики, клеевые пленки, теплозащитные покрытия и другие материалы влияют на геометрию изделия и должны учитываться при формировании электронного макета. Соединения (механические связи) являются производными объектами, поскольку формируются из соединительных элементов и поверхностей конструктивно-технологических элементов (КТЭ) соединяемых деталей.

Для описания припусков, технологических баз, поверхностей под соединения и т.д. необходимо задавать и управлять геометрией отдельных поверхностей или комплексов поверхностей, поэтому модель составных частей и модель соединений должна структурироваться до уровня конструктивно-технологических элементов.

Это позволяет не только идентифицировать на электронном макете эти элементы при моделировании технологического процесса, но и описывать связи R^{AC} между моделями $S(A_i^C)$ и $S(C_i^A)$ (поверхности деталей и подсборок являются элементами крепежных точек и соединительных швов).

Технологическая модель сборочной единицы отражает ее состояние после выполнения технологического оператора τ_i или всего технологического процесса T_I.

Модели $S(A_I^C)$ и $S(C_I^A)$ имеют одинаковую форму описания и включают в себя структурную, параметрическую и геометрическую части. Тогда формула (2) с учетом (3) может быть представлена следующим образом:

$$S(A_I^т)_i = \{[S^S(A_I^C)_i,\ S^N(A_I^C)_i,\ S^г(A_I^C)_i],\ [S^S(C_I^A)_i,\ S^N(C_I^A)_i,\ S^г(C_I^A)_i,\ R_i^{AC}]\}, \qquad (4)$$

где $S^S(A_I^C)_i$, $S^N(A_I^C)_i$, $S^г(A_I^C)_i$ – соответственно структурная, параметрическая и геометрическая модели составных частей A_I (i-е состояние);

$S^S(C_I^A)_i$, $S^N(C_I^A)_i$, $S^г(C_I^A)_i$ – соответственно структурная, параметрическая и геометрическая модели соединений A_I (i-е состояние).

Конструкторский электронный макет изделия является исходным объектом для формирования различных состояний технологической модели СЕ. В преобразовании (1) описание сборочной единицы включает в себя конечное состояние технологической модели СЕ $S(A_I^т)_k$, формируемое в соответствии с требованиями на сборку и начальное состояние технологической модели $S(A_I^т)_0$, соответствующее условиям поставки составных частей на сборку.

В ходе проектирования технологического процесса формируют промежуточные состояния технологической модели $S(A_I^т)_i$. Каждое промежуточ-

ное состояние $S(A_{\text{I}}^{\text{т}})_i$ представляет собой электронный макет СЕ, интегрирующий в себе все изменения, накопившиеся в исходном технологическом макете на момент реализации технологического оператора.

2.2. Модели технологических процессов

Модель технологического процесса сборки $S^{\text{р}}(T_{\text{I}}^{A})$ является формализованным описанием комплекса работ по установке и соединению составных частей СЕ в целях получения конструкции, отвечающей заданным требованиям. Она является компьютерной моделью, реализуемой в информационно-программной среде, описывает взаимодействия и изменения сборочной единицы и элементов производственно-технологической среды в ходе технологического процесса сборки. Структурными элементами модели являются технологические операторы, соответствующие операциям и переходам различных видов работ.

При интерпретации моделей технологического процесса средствами автоматизированной системы могут реализовываться следующие процедуры:

■ автоматизированное получение комплекта технологической документации с использованием редактора технологических документов системы проектирования;

■ формирование анимационного фильма с использованием визуализатора технологического процесса системы проектирования;

■ выбор информации из модели технологического процесса и передача ее в среду других информационных систем (например, в систему планирования и управления производством).

С учетом специфики задач проектирования технологического процесса сборки его модель должна соответствовать требованиям:

♦ дискретности, т.е. описывать нелинейное изменение структуры, параметров и геометрии изделия в результате выполнения технологических операторов;

♦ динамичности, т.е. описывать взаимодействия объектов технологии в пространстве и во времени;

♦ структурированности, отражающей иерархическое разбиение процесса на операции, переходы, проходы, рабочие движения;

♦ интерпретируемости и детерминированности, т.е. возможности однозначной интерпретации с детализацией, соответствующей определенному уровню, если свойства и параметры модели на заданном уровне полностью определены.

Модель технологического процесса $S(T^A)$ будем представлять в виде тройки моделей:

$$S(T^A)=\{S^{\Phi}(T^A),\ S^N(T^A),\ S^S(T^A)\},\qquad(5)$$

где $S^{\Phi}(T^A)$, $S^N(T^A)$, $S^S(T^A)$ – соответственно функциональная, параметрическая и структурная модели.

Функциональная модель технологического процесса описывает преобразование технологической модели изделия в ходе технологического процесса. С учетом структуры (2) технологической модели сборочной единицы функциональную модель технологического процесса $S^{\Phi}(T^A)$ описывают тройкой моделей:

$$S^{\Phi}(T^A)=\{S^{\Phi S}(T^A),\ S^{\Phi N}(T^A),\ S^{\Phi.\text{г}}(T^A)\},\qquad(6)$$

где $S^{\Phi S}(T^A) = \Phi_{\text{т}}$: $S^S(A^T)_0 \to S^S(A^{\text{т}})_k$; $S^{\Phi N}(T^A) = \Phi_{\text{т}}$: $S^N(A^{\text{т}})_0 \to S^N(A^{\text{т}})_k$; $S^{\Phi.\text{г}}(T^A) = \Phi_{\text{т}}$: $S^{\text{г}}(A^{\text{т}})_0 \to S^{\text{г}}(A^{\text{т}})_k$ описывают соответственно преобразования структурной $S^S(A^{\text{т}})$, параметрической $S^N(A^{\text{т}})$ и геометрической $S^{\text{г}}(A^{\text{т}})$ моделей изделия из начального в конечное состояние.

Параметрическая модель $S^N(T^A)$ технологического процесса включает в себя идентификационную часть (наименование, обозначение, применяемость, статус), технические требования к выполнению, технико-экономические параметры (трудоемкость, цикл, расходуемые ресурсы).

Структурная модель $S^S(A^{\text{т}})$ технологического процесса отражает его декомпозицию на элементы (операции, переходы, рабочие движения) и описывается иерархическим графом – деревом. На каждом иерархическом уровне модель технологического процесса $S^{\text{р}}(T^A)^J$ представляют в виде множества моделей технологических операторов:

$$S^{\text{р}}(T^A)^J=(S(\tau_1^J),\ S(\tau_2^J),\ \ldots,\ S(\tau_i^J),\ \ldots,\ S(\tau_k^J)),\qquad(7)$$

где $S(\tau_i^J)$ – модель i-го технологического оператора уровня J.

Модель технологического оператора любого уровня может быть представлена в виде системы взаимосвязанных моделей, описывающих различные группы его свойств:

$$S(\tau_i^J)=\{S^{\Phi}(\tau_i^J),\ S^N(\tau_i^J),\ S^S(\tau_i^J)\},\qquad(8)$$

где $S^{\Phi}(\tau_i^J)$, $S^N(\tau_i^J)$, $S^S(\tau_i^J)$ – функциональная, параметрическая и структурная модели оператора τ_i^J соответственно.

Функциональная модель $S^{\Phi}(\tau_i^J)$ содержит описание вида, объекта и результата воздействия технологического оператора на объект (изделие или элемент производственной системы).

Параметрическая модель $S^N(\tau_i^J)$ включает в себя описание идентификационной части, качественных параметров, характеризующих методы и приемы выполнения работы, количественных параметров (технологические режимы и технико-экономические показатели) и лингвистических параметров, описывающих слова и словосочетания, используемые в виде вставок при формировании структурированных текстовых фраз, отражающих содержание технологических операций и переходов.

Структурная модель $S^S(\tau_i^J)$ описывает взаимосвязи оператора τ_i^J с операторами верхних и нижних иерархических уровней.

Если принять четырехуровневую структуру технологического процесса, то в соответствии с методологией системно-структурного анализа его полная модель может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned}
&S(T^A)^1 = \Phi_T^1 : S(A^{\text{т}})_0 \to S(A^{\text{т}})_k, \quad S^N(T^A), \{\tau^2\},\\
&S(T^A)^2 = \{\phi^2\tau_i^2 : S(0)_{i-1} \to S(0)_i, \quad S^N(\tau_i^2), i = 1\ldots n\}, R^{\tau 2}, \{\tau^3\},\\
&S(T^A)^3 = \{\phi^3\tau_j^3 : S(0)_{j-1} \to S(0)_j, \quad S^N(\tau_j^3), j = 1\ldots k\}, R^{\tau 3}, \{\tau^4\},\\
&S(T^A)^4 = \{\phi^4\tau_1^4 : S(0)_{1-1} \to S(0)_1, \quad S^N(\tau_1^4), 1 = 1\ldots q\}, R^{\tau 4}.
\end{aligned} \tag{9}$$

На первом уровне описывают функцию преобразования $\Phi_{\text{т}}^1$ и параметры процесса $S^N(T^A)$ как целого, а также состав структурных элементов (операций) второго уровня $\{\tau^2\}$.

На втором уровне для каждой операции τ_i^2 в свою очередь описано реализуемое функциональное преобразование $\phi^2\tau^2$ и параметрическая модель этого преобразования $S^N(\tau_i^2)$, а кроме того, заданы связи между технологическими операторами этого уровня $R^{\tau 2}$ и состав технологических операторов третьего уровня $\{\tau^3\}$. $R^{\tau 2}$ отражают отношения предшествования-следования между операторами и характер их совмещения во времени: последовательное, параллельное, последовательно-параллельное.

На третьем уровне аналогично описывают переходы технологической операции.

На четвертом уровне – структурные элементы переходов (приемы, рабочие движения), которые далее не детализируют. Операторы четвертого уровня привязаны к операторам третьего уровня, не отображаются в дереве технологического процесса и используются для анимации работы исполнителя с помощью антропометрического манекена.

Данная структура модели технологического процесса является основой для формирования анимационных моделей разной степени детализации. Количество кадров (степень дискретности) зависит от того, с какого уровня идет формирование анимационной модели. На уровне ТП формируют два кадра, отражающих начальное и конечное состояния. На втором уровне количество кадров определяют количеством операций. На третьем уровне изделие может визуализироваться после каждого перехода и т.д.

2.3. Модель проектирования технологического процесса $S^{\text{п}}(T_1^A)$ является порождающей моделью и содержит комплекс взаимосвязанных проектных процедур и операций, направленных на получение проектного решения в виде модели технологического процесса сборки на основании исходного описания изделия и производственно-технологической среды. Модель включает в себя операции и процедуры, связанные с поиском и подготовкой необходимой исходной информации, формированием структуры технологического процесса, выполнением расчетов и оптимизацией технологического процесса.

$S^{\text{п}}(T_1^A)$ является алгоритмической моделью, описывающей последовательность проектных процедур и операций по преобразованию исходных данных в модель технологического процесса. Она должна обладать свойствами дискретности (представление алгоритма в виде последовательности шагов), определенности (за конечное число шагов либо должен быть получен результат, либо доказано его отсутствие), однозначности (при повторном применении алгоритма к тем же исходным данным должен быть получен тот же результат), возможности многократного применения к типовым объектам (с учетом ограничений).

Проектирование технологического процесса реализуют в автоматизированном режиме, т.е. часть процедур проектирования выполнена пользователем, часть – автоматизированной системой проектирования. Объем и степень сложности проектных процедур, выполняемых системой, определяют степень автоматизации проектирования и уровень интеллектуальной информационной поддержки процесса проектирования. Структурными элементами $S^{\text{п}}(T_1^A)$ являются модели проектирования технологических операций и переходов по отдельным видам работ.

Основой информационной среды системы технологического проектирования являются базовые и комплексные технологические модули, представленные в программном виде алгоритмы проектирования технологических операций и переходов.

Базовый технологический модуль (БТМ) является первичным структурным элементом информационной среды технологического проектирования и представляет собой модель проектирования однопереходной типовой технологической операции. БТМ содержит: идентификационную часть (дескриптор, наименование вида работ, идентификаторы алгоритмов геометрических преобразований объектов, нормирования и расчета технологических параметров), постоянную информацию (текстовые формулировки типовой технологической операции, список ссылок на НТД), переменную информацию об изделии, условия выбора способов выполнения работ и средств технологического оснащения, характеристики для определения норм времени и расчета технологических режимов. При классификации видов работ БТМ объединяют в группы по общности конструктивно-технологических свойств изделий и их элементов, а также по способам выполнения работ.

Комплексный технологический модуль (КТМ) проектирования многопереходной типовой технологической операции, группы операций либо типового технологического процесса, представленный в виде совокупности БТМ, при обработке которого формируется модель технологического решения (операция, группа операций, технологический процесс). КТМ содержит: идентификационную часть (дескриптор, наименование вида работ, идентификаторы входящих БТМ, алгоритмов нормирования и расчета технологических параметров), постоянную информацию (текстовые формулировки операций и переходов), условия включения входящих БТМ в результирующую модель технологического процесса.

2.4. Процедурно-алгоритмическая среда реализует функционал автоматизированной системы технологического проектирования и предоставляет возможность пользователю осуществлять моделирование, проектирование и документирование технологических процессов сборки.

3. Применение и направления развития системы ТЕМП

Систему ТЕМП применяют в проекте семейства новых российских региональных самолетов (Russian Regional Jet – RRJ) как компонента интегрированной корпоративной системы технологического проектирования [10] и проходит опытно-промышленную эксплуатацию по двум направлениям:

• в технологических подразделениях КБ – для отработки технологичности изделий на основе анализа электронных макетов сборочных единиц, проектирования и нормирования директивных технологических процессов (рис. 1, см. 2 стр. обложки), формирование их виртуальных моделей (рис. 2, см. 2 стр. обложки), получение электронной технологической документации.

• на серийном заводе – для проектирования и нормирования рабочих технологических процессов, формирования комплектов технологической документации, формирования и ведения информационной среды сборочных работ.

Особое внимание уделяют вопросам интеграции системы ТЕМП с информационными системами предприятий. PDM – система (Teem Center Engineering) используется для решения задач управления конфигурацией изделия, проведения изменений в конструкторской и технологической документации. Данные из модели технологического процесса, сформированного в системе ТЕМП, подготавливают для передачи в ERP-систему для решения задач управления производством.

Опытно-промышленная эксплуатация *системы* показала, что ее применение обеспечивает снижение трудоемкости проектирования технологических процессов в 3–5 раз, значительное сокращение ошибок при технологическом анализе конструкторской документации, повышение достоверности и экономической обоснованности принимаемых конструктивно-технологических решений сборочного производства, повышение качества технологической документации, снижение требований к квалификации технологов – разработчиков процесса.

Создание программных комплексов с использованием базовых систем от мировых лидеров, интегрированных с отечественными программными продуктами, позволит не только решить проблемы внедрения инженерной поддержки жизненного цикла изделия (ИПИ-технологий) на российские предприятия, но и обеспечат им возможность участия в международных проектах.

В состав системы ТЕМП входят подсистемы, реализующие следующие функции:

■ ТЕМП-АСП (Ядро системы ТЕМП и подсистема проектирования рабочих технологических процессов сборки – каркасные работы).

Формирование и ведение информационной среды. Конвертирование электронных макетов из базовых CAD-систем. Формирование технологической модели сборочной единицы, включая модели соединительных швов (заклепочных, болтовых и т.д.). Проектирование и нормирование рабочего технологического процесса (РТП). Формирование комплекта технологической документации РТП. Формирование технологических паспортов и комплектовочных карт. Формирование цикловых графиков РТП. Анализ рабочих зон. Формирование эскизов (2D).

■ ТЕМП-ДТП-С (Директивные технологические процессы сборки).

Проектирование и нормирование директивных технологических процессов сборки. Поддержка двухуровневого проектирования (ДТП – РТП). Формирование комплекта технологической документации ДТП. Формирование цикловых графиков ДТП. Формирование технологических комплектов с привязкой к этапам циклового графика;

■ ТЕМП-Св (Проектирование технологических процессов сборки-сварки).

Формирование технологических моделей сварных изделий, включая модели сварных швов. Проектирование установочных операций, соединительных операций (рис. 3, см. 3 стр. обложки), расчет режимов и нормирование технологических процессов сборки-сварки. Формирование технологической документации.

■ ТЕМП-Монтаж ТС (монтаж трубопроводных систем).

Отображение и отслеживание схем трубопроводных систем. Моделирование процессов заведения элементов конструкции планера и трубопроводных систем в зону выполнения работ с учетом геометрических конфликтов, выполнение соединений трубопроводов (рис. 4, см. 3 стр. обложки), моделирование прокладки трубопроводов с учетом колодок, хомутов и т.п. Анализ возможности работы специальным инструментом в зоне монтажа. Анализ возможности проведения испытаний (открытость трубопровода и т.п.). Конвертирование схем трубопроводных схем из CAD-системы в формат ТЕМП.

■ ТЕМП-Монтаж ЭС (монтаж электрических систем).

Отображение и отслеживание принципиальных электрических схем в 2D-режиме. Формирование жгутов с учетом принципиальных электрических схем и отслеживание состояния таблицы соединений. Моделирование процессов заведения и прокладки электрических жгутов и кабелей при выполнении электромонтажных работ. Визуализация и синхронизация макетов электросборок и электрических схем (рис. 5, см. 3 стр. обложки), а также жгутов в 3D. Проектирование процессов вязки жгутов. Конвертирование принципиальных электрических схем из CAD-системы в формат ТЕМП.

Система ТЕМП используется при реализации ряда других проектов. Планируются работы по созданию новых компонентов системы ТЕМП для моделирования и проектирования технологических процессов по другим видам производств (заготовительно-штамповочному, механическому), а также по ее адаптации для внедрения в двигателестроении (включая технологии обвязки газотурбинных двигателей), судостроении, энергетическом машиностроении.

Список литературы

1. **ГОСТ 2.052–2006.** Электронная модель изделия. Общие положения. Издательство стандартов, 2006. 12 с.

2. **ГОСТ 2.053–2006.** Электронная структура изделия. Общие положения. Издательство стандартов, 2006. 10 с.

3. **САПР.** Типовые математические модели объектов проектирования в машиностроении. РД 50-464–84. М.: Издательство стандартов, 1985. 201 с.

4. **Бабушкин А.И.** Моделирование и оптимизация сборки летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1990. 240 с.

5. **Самсонов О.С., Тарасов Ю.М.** Проблемы интеграции прикладных систем. САПР и графика № 1, 2000. С. 42–46.

6. **Самсонов О.С., Гахов А.В., Сосунов Д.В., Толстопятов И.И.** Автоматизированная система подготовки агрегатно-сборочного производства // Авиационная промышленность. 2002. № 1. С. 32–36.

7. **Соколов В.П., Цырков А.В.** Математическое, методическое и организационное обеспечение технологической подготовки производства. Информационные технологии в наукоемком машиностроении. Київ: "Техника". 2001. С. 475–501.

8. **Самсонов О.С.** Моделирование процессов конструкторско-технологического проектирования сборки летательных аппаратов // Технология машиностроения. 2007. № 9. С. 18–26.

9. **Давыдов Ю.В., Самсонов О.С., Тарасов Ю.М.** Подготовка производства самолетов семейства RRJ с использованием ИПИ-технологий. Труды 5-го Международного конгресса конструкторско-технологическая информатика. Станкин, 2005. С. 22–26.

10. **Громашев А.Г.** Технологическое проектирование высокоресурсных и заклепочных соединений. Актуальные проблемы самолетостроения. Киев: Издательская компания "КИТ", 2007. 344 с.

В.М. Виноградов, Б.В. Шандров, *кандидаты техн. наук (МГТУ "МАМИ")*

Особенности сборки и контроля сложного зуборезного инструмента для обработки зубчатых колес автомобильных трансмиссий

Рассмотрены вопросы, касающиеся особенностей сборки и контроля сложного зуборезного инструмента для нарезания цилиндрических и конических колес автомобильных трансмиссий. На примере сегментных круговых протяжек и резцовых головок клинового типа описаны приемы сборки и контроля инструмента при его изготовлении и после перезаточки.

Круговые протяжки сегментного типа (рис. 1, *а*) и резцовые головки клинового типа со вставными резцами (рис. 1, *б*) для нарезания цилиндрических и конических колес трансмиссий автомобилей представляют собой сложный дорогостоящий сборный режущий инструмент со съемной режущей частью. От качества сборки режущей части и установки инструмента на станке во многом зависит точность зубонарезания и шероховатость боковых сторон обрабатываемых зубьев.

Технология сборки и контроля при изготовлении и перезаточке такого инструмента имеет свои специфические особенности, которые необходимо учитывать при эксплуатации в производственных условиях [1].

При сборке круговых протяжек резцовые сегменты *2* устанавливают в определенной последовательности в кольцевой паз корпуса *1* протяжки, поджимают торцами к клиньям (в протяжках с упорными клиньями) или торцами один к другому, и с помощью динамометрического ключа закрепляют винтами *3* с постоянным крутящим моментом (около 69 Н·м). Крепление резцовых сегментов к корпусу с одним и тем же моментом обеспечивает их надежную и точную взаимную установку (до 0,005 мм) по оси симметрии профилей.

При установке круговых протяжек сегментного типа на инструментальном шпинделе зубопротяжного станка крепежные болты *4* также затягивают ключом с постоянным крутящим моментом. Круговые протяжки, как и резцовые головки для нарезания конических колес, устанавливают на шпиндель станка одновременно на две поверхности (коническую К и торцовую Т) (см. рис. 1, *а*). Для этого между торцом инструментального шпинделя станка и опорным торцом корпуса протяжки должен быть зазор 0,13...0,20 мм, обеспечивающий натяг, который соответствует легкой посадке корпуса протяжки на шпиндель станка. Для получения правильной посадки центральный зажимной винт затягивают ключом с крутящим моментом 7 Н·м, затем его ослабляют и затягивают второй раз с тем же моментом.

Зазор-натяг рекомендуют проверять через каждые шесть месяцев эксплуатации протяжки, так как по мере износа ее корпуса натяг уменьшается. Корпус восстанавливают шлифованием опорного торца.

При большом износе шлифуют опорный торец и коническое отверстие за один установ корпуса. Хромировать отверстие не рекомендуют, так как большое давление, возникающее при установке протяжки на шпиндель станка между соприкасающимися поверхностями, вызывает отслоение тонкой пленки.

Как показал опыт эксплуатации круговых протяжек на автозаводах, срок службы их корпусов 3–4 года, т.е. ремонтировать круговые протяжки нецелесообразно.

Ввиду многократного использования корпуса круговой протяжки основной контроль точности ее изготовления и затачивания сводят к контролю режущей части. Комплекты режущих сегментов могут отличаться друг от друга по высоте и положению оси симметрии режущих зубьев, поэтому перед установкой круговой протяжки на зубопротяжной станок проверяют:

- высоту вершин и точность изготовления профиля режущих зубьев;
- перепады от зуба к зубу;
- расположение режущих кромок относительно базового торца протяжки;
- передний угол резцов.

Требования к точности расположения резцов в зуборезных головках клинового типа со вставными

резцами для нарезания конических колес были и остаются очень высокими: радиальное биение режущих кромок резцов до 0,004 мм, торцовое биение вершин резцов до 0,04 мм и погрешность угла профиля резцов ("веера") до 0,004 мм. Поэтому перед сборкой зуборезного инструмента все детали, входящие в него (корпус, резцы, резцовые сегменты, клинья, подкладки, винты и т.д.) должны быть тщательно промыты в очищенном керосине и очищены от ржавчины, грязи и забоин.

Детали после промывки протирают мягкой чистой бумагой или специальным материалом, хлопчатобумажные материалы применять не рекомендовано, так как после их употребления на деталях остаются волокна. После правильной установки резцов в пазы корпуса резцовой головки каждый резец закрепляют с постоянным крутящим моментом при помощи тарированного ключа.

Контроль отдельных элементов нового зуборезного инструмента или после его заточки выполняют с использованием специальных приборов и приспособлений.

Проверка высоты вершин режущих зубьев резцовых головок сегментного типа заключена в измерении отклонения высоты последнего сегмента чистовых калибрующих зубьев от номинала. Колебания высот сегментов от комплекта к комплекту обычно составляет от десятых долей до нескольких миллиметров, поэтому после каждой замены резцовой головки возникает необходимость в радиальной подналадке зубопротяжного станка.

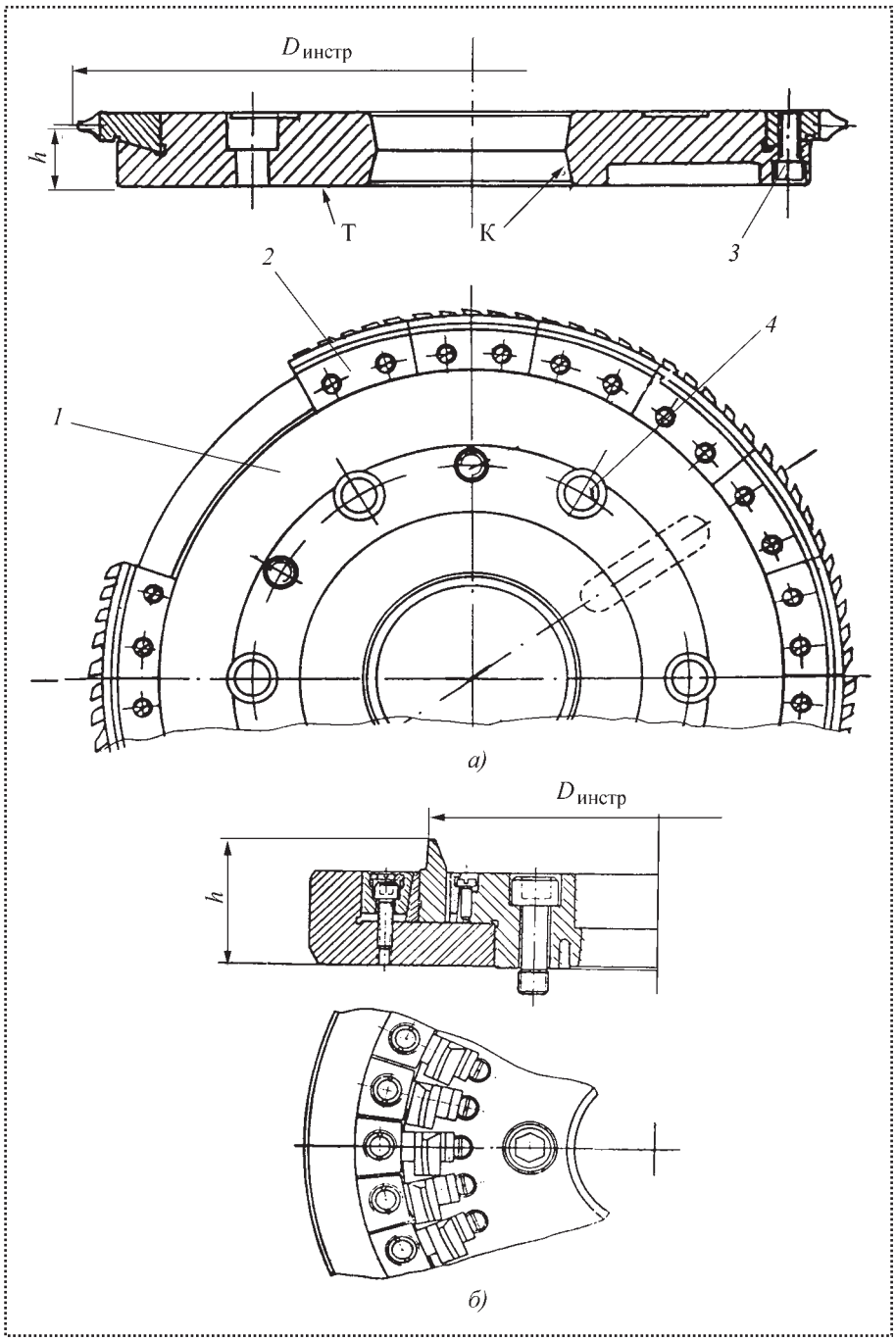


Рис. 1. Конструкции зуборезных головок:
а – сегментного типа, работающих по методу кругового протягивания; *б* – клинового типа со вставными резцами для нарезания конических колес; *1* – корпус; *2* – резцовые сегменты; *3* – винты крепления сегментов; *4* – винты крепления протяжки к шпинделю станка; *h* – наладочный размер; К – посадочный конус; Т – посадочный торец инструмента; $D_{инстр}$ – диаметр инструмента

Контроль производят с помощью специального накладного приспособления, разработанного Витебским СКБ ЗС (рис. 2).

Приспособление состоит из корпуса *1*, на котором крепится подвижный ползун *2* с контрольной планкой *3*. На конце корпуса, противолежащего кон-

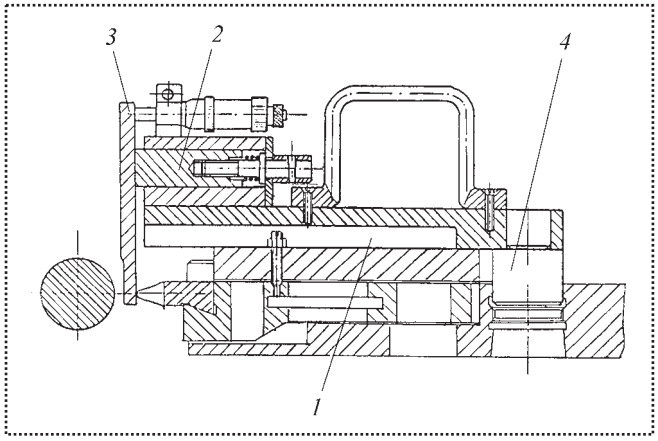


Рис. 2. Прибор для контроля высоты резцов непосредственно на протяжной головке

трольной планке, запрессована пробка *4*, служащая базовым центрирующим элементом приспособления. Пробку устанавливают в посадочное отверстие круговой протяжки. Она ориентирует приспособление относительно центра режущего инструмента. Подпружиненный ползун *2* обеспечивает прижим планки *3* с постоянной силой к вершине проверяемого режущего зуба круговой протяжки.

Над ползуном на специальном кронштейне устанавливают микрометрическую головку нормальной точности ГМР–01, измерительный щуп которой подводят к контрольной планке. Установку нулевого положения приспособления осуществляют с помощью блока плиток относительно опорного цилиндра резцовых сегментов протяжки. Отклонение высоты резцовых сегментов измеряют с точностью до 0,01 мм. При перезатачивании изношенных сегментов высоту резцов проверяют на заточном станке в процессе работы.

Поскольку нарезание цилиндрических колес круговыми протяжками основано на использовании метода копирования, то точность профилирования режущих зубьев инструмента, особенно чистовых, играет решающую роль в достижении высокой точности обработки. Таким образом, контроль профиля резцов круговых протяжек является одной из главных операций при определении пригодности инструмента к эксплуатации.

В последнее время на Челябинском инструментальном заводе изготовлен, а на Свердловском инструментальном заводе внедрен прибор мод. БВ–5065 [2], предназначенный для контроля профилей резцов круговых протяжек в сборе. Прибор (рис. 3) выполнен в виде литой станины с разме-

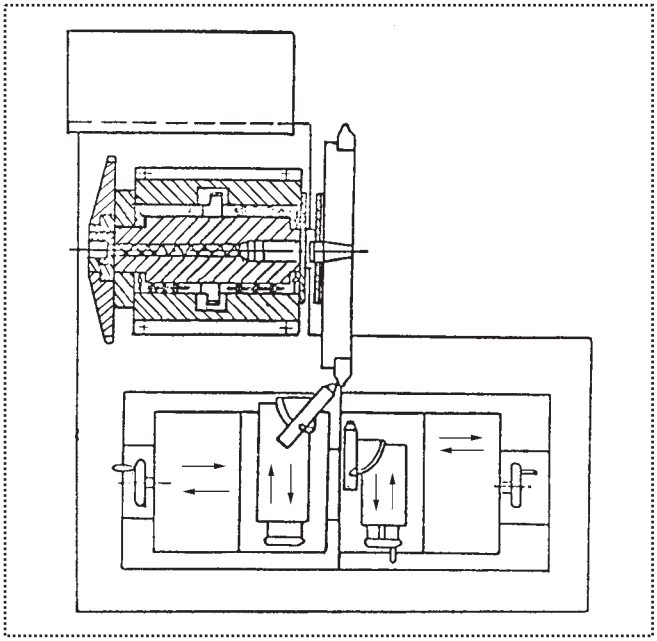


Рис. 3. Прибор мод. БВ –5065 для контроля профилей резцов круговых протяжек в сборе

щенными на ней шпинделем и двумя каретками с механизмами настройки. На шпинделе установлены планшайба с базовыми посадочными поверхностями для проверяемой круговой протяжки, сменный делительный диск и механизм для фиксации настройки делительного диска относительно шпинделя, служащий для точной установки зуба протяжки в плоскости измерения.

Каретки перемещаются на шариковых направляющих во взаимоперпендикулярных направлениях. На осях кареток установлены индуктивные преобразователи. Совмещение их осей вращения с расчетными координатами центров дуг, образующих левый и правый профили режущих зубьев круговой протяжки, производят микрометрическими винтами кареток, которые через бесконтактные сельсины типа БС–155А соединены с блоками цифровой индикации типа Ф–5071, где регистрируют перемещения кареток с дискретностью 0,001 мм.

Индуктивные преобразователи работают с электронной измерительной системой мод. 214 и настраиваются на нуль по установленному образцу. По отклонению от нуля определяют фактическую погрешность контролируемого зуба.

Прибор мод. БВ–5065 предназначен для контроля круговых протяжек диаметром 400...630 мм с радиусами дуг контролируемого бокового профиля в пределах 10...60 мм. Погрешность системы цифро-

вой индексации для отсчета расчетных координат центров дуг от базовых плоскостей составляет 2 мкм, а погрешность измерительной системы, контролирующей отклонения профилей дуг, 1...2 мкм.

Для обеспечения высокой стабильности процесса зубонарезания круговым протягиванием, уменьшения вибраций в процессе резания, повышения точности обработки и стойкости режущего инструмента боковые профили чистовых режущих зубьев резцовых сегментов круговых протяжек после изготовления и перезаточки необходимо выверять с точностью + 0,006 мм на специальном приборе (рис. 4).

На приборе проверяют перепады на зуб черновых и чистовых сегментов и расположение режущих кромок относительно базового торца протяжки, т.е. развод резцов. Контролируемую круговую протяжку диаметром до 640 мм устанавливают на соответствующее посадочное место шпинделя прибора *12* и крепят винтами. После этого рукояткой *11* протяжке сообщают необходимое вращательное движение, измерительный наконечник прибора скользит по соответствующим поверхностям резцов, а отклонения фиксируют индикатором.

В целях обеспечения измерения в нормальном направлении к режущей кромке планку *5* с индикаторами ставят в наклонное положение, при этом винты *4* ввертывают в резьбовые отверстия *6*. Маховиком *10* суппорт *8* может быть установлен в необходимое для измерения положение.

На приборе обычно производят не только контроль протяжек после перезаточки, но и сборку, установку режущих сегментов и другие профилактические мероприятия. Если приспособление используют в качестве сборочного кондуктора, то стол приспособления может быть зафиксирован рукояткой *1*.

При подналадке заточенных резцов и установке на корпус протяжки новых резцовых сегментов возникает необходимость в отводе суппорта *8*. Необходимое первоначальное положение измерительных наконечников *2* и *3* относительно резцов определяют по показаниям индикаторов *7* и *9*. Используя суппорт *8*, на приборе можно измерить радиальное биение резцовых сегментов, их высоту и ряд других параметров круговых протяжек.

Измерение перепадов от зуба к зубу черновых и чистовых сегментов проводят с помощью измерительного наконечника *2*, устанавливаемого по режущей кромке последнего профилирующего резца протяжки. При проверке расположения режущих

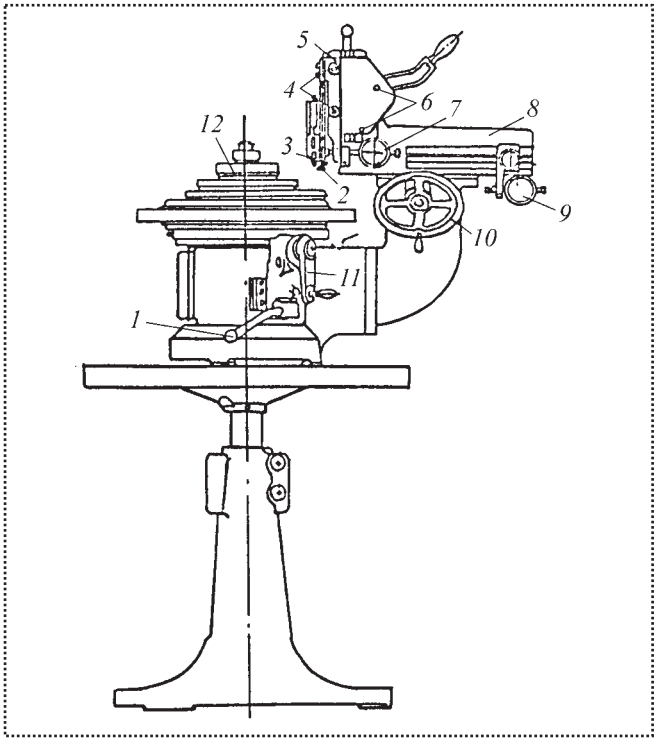


Рис. 4. Прибор для контроля точности расположения резцов головок при сборке и после перезатачивания

кромок резцов относительно базового торца протяжки стержень индикатора устанавливают в точке, отстоящей от вершины резца на 0,5 полной высоты зуба. Биение режущих кромок двух соседних резцов относительно базового торца протяжки не должно превышать 0,01 мм.

Повышенное биение режущих кромок резцов относительно базового торца протяжки возникает в результате чрезмерного затягивания винтов крепления резцовых сегментов или при приложении различного крутящего момента при затягивании винтов, а иногда от попадания грязи и мелкой стружки под посадочные поверхности резцовых сегментов. Учитывая это, рекомендуют при установке нового комплекта резцовых сегментов полностью разобрать круговую протяжку, промыть ее, тщательно очистить и снова собрать.

Перед выверкой резцовых сегментов следует удалить заусенцы, образовавшиеся на режущих кромках зубьев после перезаточки. Эту операцию выполняют с помощью мягкой металлической щетки. Применять для этой цели абразивные бруски не рекомендуют.

В настоящее время фирма Глиссон выпустила прибор мод. 528, на котором можно контролиро-

вать круговые протяжки диаметром до 25″ (635 мм), применяемые для нарезания цилиндрических и конических колес с прямыми зубьями. Прибор позволяет измерять радиальное биение режущих кромок резцов, ошибки шага между соседними резцами, перепады между ними и расположение режущих кромок относительно базового торца.

При организации службы перезатачивания и контроля круговых протяжек, применяемых для нарезания цилиндрических колес, целесообразно шире использовать накопленный опыт по нарезанию конических зубчатых колес.

При обработке конических зубчатых колес трансмиссий автомобилей для получения низкой шероховатости поверхности на профиле зубьев и повышения стойкости инструмента режущие кромки резцов чистовых головок после перезаточки должны быть выверены с точностью до 0,0025 мм на приборе, аналогичном ранее рассмотренному (см. рис. 4). Индикатор с подвижным суппортом подводят к резцовой головке, закрепленной на столе, и устанавливают по режущей кромке базового резца, т.е. резца, не имеющего регулирующего клина. Все последующие однотипные резцы устанавливают так же, как базовый резец при помощи регулирующих клиньев. При контроле головок для нарезания конических шестерен стержень индикатора рекомендуют устанавливать в точке, отстоящей от вершины резца на расстоянии приблизительно 0,7 от полной высоты зуба.

Резцы чистовых резцовых головок для нарезания конических колес повышенной точности следует выверять после перезаточки. Кроме того, головки на протяжении срока эксплуатации одного комплекта резцов рекомендуют три раза полностью разбирать, промывать, тщательно очищать и снова собирать. При разборке и сборке головки не следует нарушать комплектацию клиньев, подкладок и резцов, комплект этих деталей необходимо устанавливать в те же пазы, из которых они были вынуты ранее.

Отклонение угла профиля резцов в головке от угла базового резца на длине режущей кромки, соответствующей высоте зуба обрабатываемого колеса, получило название "веера". Веер измеряют в мкм. Волнистость на профиле нарезанного зуба колеса является основным признаком "веера" в резцах головки. Угол профиля резцов контролируют при установке нового комплекта резцов, а также после очередной разборки и сборки головки в процессе эксплуатации. Для проверки отклонений угла профиля резцов головку устанавливают в специальное контрольное приспособление.

Вывод

Обеспечение стабильной высокой точности зубонарезания цилиндрических и конических зубчатых колес трансмиссий автомобилей в условиях крупносерийного производства может быть достигнуто только при грамотной эксплуатации сборного зуборезного инструмента, включающей точное выполнение последовательности и тщательности сборки и его контроля при изготовлении и после перезаточки с использованием специальных приборов и приспособлений.

Предложенные в статье мероприятия по сборке и контролю круговых протяжек и резцовых головок имеют определенную практическую ценность для автозаводов, использующих такой инструмент в своих механосборочных цехах.

Список литературы

1. **Виноградов В.М.** Особенности сборки и контроля круговых протяжек. НИИНавтопром. Н / Т сб. "Технология автомобилестроения". 1976. № 6.

2. **Металлорежущий** и контрольно-измерительный инструмент. Экспресс-информация, вып. 6. НИИНМАШ, 1977.

Новая книга!

Кондаков А.И., Васильев А.С. **Выбор заготовок в машиностроении:** справочник. М.: Машиностроение, 2007. 560 с.
ISBN 978-5-217-03383-6

Изложен методический подход и необходимое информационное обеспечение для обоснованного выбора исходных заготовок в условиях современного многономенклатурного машиностроительного производства. Приведены характеристики свойств основных машиностроительных материалов и рекомендации по их выбору. Даны сведения об основных видах заготовок и способах их изготовления. Указаны основные критерии и правила выбора заготовок. Изложены различные методики обоснования решений, принимаемых при выборе заготовок. Рассмотрены проблемы автоматизации выбора заготовок на основе современных информационных технологий.

В.Д. Аввакумов, *канд. техн. наук (Новоуральский государственный технологический институт)*

Методы расчета массово-геометрических характеристик 3D-мерных объектов и сборок с учетом разброса размеров в поле допуска. *Продолжение**

Рассмотрены методы расчета массово-геометрических характеристик (МГХ) 3D-мерных объектов и сборок с учетом разброса размеров в поле допуска. Расчет проведен методом "максимум–минимум" и вероятностным методом (Монте-Карло). Рассмотрены системы материальных точек, расположенных в пространстве, тела переноса, тела неполного вращения и сборки, представляющие собой совокупность тел вращения и переноса. Приведены примеры расчета массово-геометрических характеристик рассматриваемых объектов.

2. Расчет МГХ тел переноса

В [1] приведены формулы для МГХ некоторых тел переноса. Возникает вопрос: можно ли проводить вычисления МГХ тел переноса по МГХ плоского контура, образующего тело переноса, и его длине? Исследования, проведенные автором, позволили ответить на этот вопрос положительно.

Пусть телом переноса является плита (рис. 3, *а*), образованная плоским контуром (рис. 3, *б*). Для тел переноса по формулам, приведенным в [1], вычисляют следующие МГХ:

V – объем тела;

x_O, y_O, z_O – координаты центра масс;

$J_{y_O}O_{z_O}$, $J_{z_O}O_{x_O}$, $J_{x_O}O_{y_O}$ – моменты инерции относительно центральных плоскостей;

$J_{x_Ox_O}$, $J_{y_Oy_O}$, $J_{z_Oz_O}$ – моменты инерции относительно центральных осей.

Для плоского тела программа MGH вычисляет такие характеристики:

F – площадь контура (рис. 3, *б*);

X_O, Y_O – координаты центра масс;

J_x, J_y – моменты инерции;

J_{x_O}, J_{y_O} – моменты инерции относительно осей, проходящих через центр масс;

$J_{\max}$, $J_{\min}$ – главные моменты инерции;

α' – угол направления главных осей инерции;

$R_{\min}$, $R_{\max}$ – радиусы инерции.

Приведем формулы, связывающие МГХ плоского тела с МГХ тела переноса:

$$V = Fl;$$

$$J_{y_Oo_Z_O} = \rho l J_{x_O};$$

$$J_{z_Oo_{x_O}} = \rho l J_{y_O};$$

$$J_{x_Oo_{y_O}} = \frac{\rho l^3}{12} F;$$

$$J_{x_Ox_O} = J_{z_Oo_{x_O}} + J_{x_Oo_{y_O}};$$

$$J_{y_Oy_O} = J_{x_Oo_{y_O}} + J_{y_Oo_{z_O}};$$

$$J_{z_Oz_O} = J_{y_Oo_{z_O}} + J_{z_Oo_{x_O}},$$

где ρ – плотность материала плиты;

l – длина плиты (длина тела переноса).

Алгоритм вычисления МГХ тел переноса следующий.

Шаг 1. По программе MGH проводят расчет плоского тела, образующего заданное тело переноса.

Шаг 2. По приведенным выше формулам программа MGH выполняет повторный расчет (по длине тела переноса и с учетом вычисленных на предыдущем шаге величин F, J_{x_O}, J_{y_O}) и вычисляет МГХ тела переноса.

Пример. Проведем по изложенному алгоритму расчет МГХ тела переноса, представленного на рис. 3, *а*.

Исходные данные для расчета (см. рис. 3)

Блок размеров (см. рис. 3) и плотностей П

1	*A*	2	0	0,015
2	*B*	4	0	0,015
3	*t*	0,5	0	0,005
4	*l*	3,0	0	0,015
1	П	1,0	0	0

* Начало см. журнал "Сборка в машиностроении, приборостроении", №5, 2008.

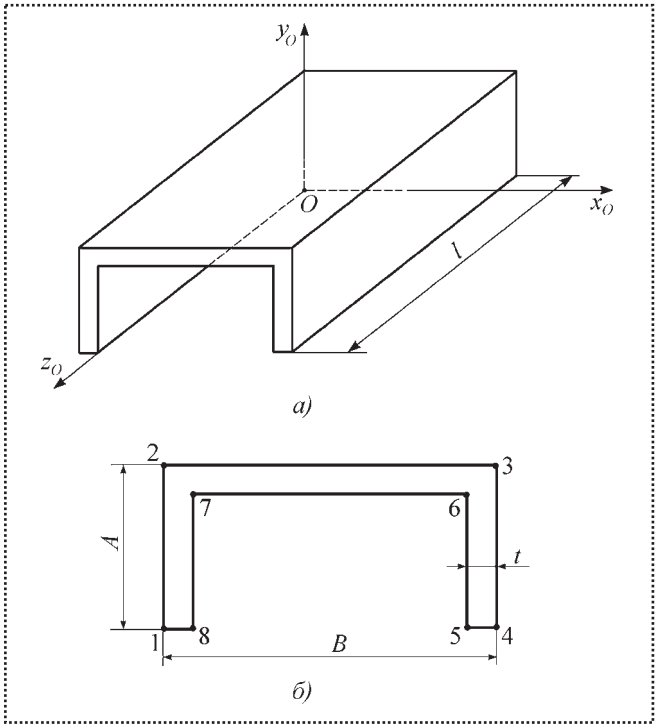


Рис. 3. Тело переноса – плита:
а – общий вид; *б* – плоский контур, образующий тело переноса; *A*, *B*, *l* – габаритные размеры; *t* – толщина плиты; 1–8 – точки контура

Блок описания точек

НАЧК	T1				
ОТРА	T1	K90	P1	T2	
ОТРА	T2	K0	P2	T3	
ОТРА	T3	K270	P1	T4	
ОТРА	T4	K180	P3	T5	
ВЫЧ	C1	P1	P3		C1 = P1 – P3
ОТРА	T5	K90	C1	T6	
СЛОЖ	C2	P3	P3		C2 = P3 + P3
ВЫЧ	C3	P2	P2		
ОТРА	T6	K180	C3	T7	
ОТРА	T7	K270	C1	T8	

Блок описания контура

1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; @

Результаты расчета представлены в табл. 6 и 7.

Полученная связь между МГХ плоской фигуры и МГХ тела переноса позволяет не только автоматизировать вычисления этих характеристик, но и учитывать допуски на размеры тела и допуск на плотность материала.

6. Результаты расчета МГХ плоского контура (шаг 1)

Величина	Метод "максимум–минимум"			Вероятностный метод		
	Номинальное значение	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение	Математическое ожидание	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение
F	3,50	0	0,053	3,53	–0,010	0,010
X_O	2,00		0,007	2,00	–0,002	0,002
Y_O	1,32	–0,002	0,010	1,32	–0,003	0,003
J_x	7,30	0	0,200	7,40	–0,042	0,042
J_y	21,30		0,480	21,53	–0,079	0,079
J_{xO}	1,18		0,036	1,20	–0,008	0,008
J_{yO}	7,30		0,162	7,37	–0,027	0,027
$J_{\max}$	7,30					
$J_{\min}$	1,18		0,036	1,20	–0,008	0,008
α'	0		0	0	0	0
$R_{\min}$	0,58		0,005	0,58	–0,001	0,001
$R_{\max}$	1,44	–0,002	0,007	1,45	–0,002	0,002

7. Результаты расчета МГХ тела переноса (шаг 2)

Величина	Метод "максимум–минимум"			Вероятностный метод		
	Номинальное значение	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение	Математическое ожидание	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение
V	10,50	0	0,212	10,60	–0,047	0,047
X_O	2,00		0,007	2,00	–0,002	0,002
Y_O	1,32	–0,002	0,010	1,32	–0,003	0,003
Z_O	1,50	0	0,008	1,50	–0,002	0,002
$J_{z_O o_{x_O}}$	21,87		0,598	22,17	–0,139	0,139
$J_{x_O o_{y_O}}$	7,88		0,240	7,99	–0,047	0,047
$J_{y_O o_{z_O}}$	3,54		0,126	3,60	–0,031	0,031
$J_{x_O x_O}$	29,75		0,838	30,16	–0,154	0,154
$J_{y_O y_O}$	11,42		0,366	11,60	–0,059	0,059
$J_{z_O z_O}$	25,41		0,724	25,77	–0,144	0,144

3. Расчет МГХ тел неполного вращения

Как показывает статистика, более двух третей деталей машин и механизмов представляют собой тела полного вращения и тела неполного вращения (ТНВ). ТНВ в конструкциях могут быть как самостоятельными деталями, так и элементами деталей и сборок. Такие тела образованы вращением плоского контура на некоторый угол φ ($0° < 2\varphi \le 360°$).

Программой MGH вычисление массово-геометрических характеристик проводится только для тел полного вращения ($\varphi = 360°$). Для проведения расчетов МГХ для ТНВ нужно иметь связь между МГХ и углом поворота плоского контура (плоский контур в программном комплексе ПИКАП [3] представляет собой замкнутую линию, состоящую из отрезков прямых и дуг окружностей).

В работе [1] зависимости МГХ от угла φ выведены для неполного тела вращения, представляющего усеченный конус, т.е. для контура, состоящего из трех отрезков прямых (образующая и два основания). Для ТНВ, образующая которого является дугой окружности, в [1] соответствующих формул нет и автору не известны работы, в которых имеются необходимые соотношения. Знание же таких зависимостей позволило бы использовать программу MGH для вычисления МГХ неполных тел вращения.

Автором выведены зависимости МГХ от угла φ для ТНВ с образующей – дугой окружности, что дало возможность применять все функциональные возможности программы MGH при расчете ТНВ: расчет МГХ по номинальным значениям и с учетом допусков на размеры тела.

Исходной информацией для расчета МГХ ТНВ по программе MGH так же, как и для тел полного вращения, является описание плоской фигуры, представляющей половину сечения тела плоскостью, проходящей через ось вращения, и задаваемой контуром, состоящим из прямых и дуг. Программа производит анализ образующей тела, выделяя ее элементы, отличающиеся между собой.

Таким образом, программным путем тело вдоль оси вращения разбивают на части (слои), у каждой из которых образующая представляет собой отрезок или дугу. Для каждого такого элемента ТНВ по формулам из [1] для образующей – отрезка, и по формулам, выведенным автором для образующей – дуги, вычисляют МГХ, и тело заменяют системой материальных точек, расположенных в плоскости, проходящей через ось вращения тела и через середину угла 2φ. Такую систему также вычисляют по программе MGH.

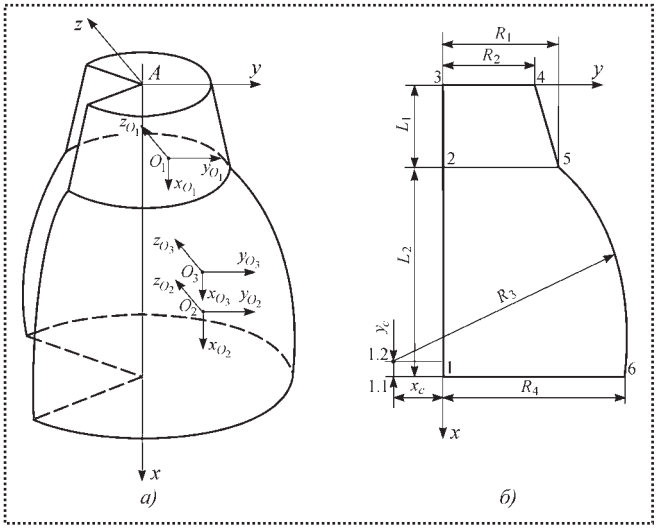


Рис. 4. Тело неполного вращения:
а – общий вид; *б* – плоский контур, образующий тело; 1–6, 1.1, 1.2 – точки контура

Пример. Рассмотрим ТНВ (рис. 4, *а*), образующая которого состоит из отрезка прямой и дуги окружности. На рисунке система координат $Axyz$ – глобальная система, связанная с телом. Контур вращается на угол $2\varphi = 300°$ (на $\varphi = 150°$ в ту и другую стороны от плоскости Axy). Система координат $O_3x_{O_3}y_{O_3}z_{O_3}$ – система, центр которой совпадает с центром масс ТНВ, а оси параллельны соответствующим осям глобальной системы. Система координат $O_1x_{O_1}y_{O_1}z_{O_1}$ – система, центр которой совпадает с центром масс конического слоя. Система координат $O_2x_{O_2}y_{O_2}z_{O_2}$ – система, центр которой совпадает с центром масс сферического слоя; x_C, y_C, z_C – координаты начала собственной системы координат тела; M – масса тела.

Ниже приведены исходные данные, промежуточные результаты (МГХ двух тел – материальных точек) и окончательные результаты расчета (табл. 8–10).

Исходные данные для расчета (рис. 4, *б*)
Блок размеров и плотностей

1	R_1	2,0	0	0,01
2	R_2	1,5		
3	R_3	5,0		
4	R_4	4,0		
5	L_1	2,3		
6	L_2	7,76		0,05
7	x_C	0,8	–0,02	0,02
8	y_C	0,3	–0,01	0,01
9	φ	150	0	0
1	П	1,0	0	0

8. Точка O_1 (коническая часть тела)

Величина	Метод "максимум–минимум"			Вероятностный метод		
	Номинальное значение	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение	Математическое ожидание	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение
M_1	18,57	0	0,293	18,71	–0,047	0,047
x_{c_1}	1,26	–0,002	0,007	1,26	–0,002	0,002
y_{c_1}	0,23	0	0,001	0,23	0	0
z_{c_1}	0		0	0		
x_{O_1}						
y_{O_1}						
z_{O_1}						
$J_{x_{O_1}x_{O_1}}$	28,45		0,769	28,82	–0,132	0,132
$J_{y_{O_1}y_{O_1}}$	25,14		0,662	25,46	–0,107	0,107
$J_{z_{O_1}z_{O_1}}$	19,33		0,505	19,58	–0,081	0,081

9. Точка O_2 (сферическая часть тела)

Величина	Метод "максимум–минимум"			Вероятностный метод		
	Номинальное значение	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение	Математическое ожидание	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение
M_2	337,12	0	3,268	338,75	–0,488	0,488
x_{c_2}	7,03	–0,010	0,013	7,03	–0,003	0,003
y_{c_2}	0,55	0	0,001	0,55	0	0
z_{c_2}	0		0	0		
x_{O_2}						
y_{O_2}						
z_{O_2}						
$J_{x_{O_2}x_{O_2}}$	3127	–0,022	43,330	3149	–7,175	7,175
$J_{y_{O_2}y_{O_2}}$	3183	–3,166	44,971	3204	–5,272	5,272
$J_{z_{O_2}z_{O_2}}$	2537	–3,186	36,198	2554	–4,029	4,029

Блок описания точек

НАЧК	T1					
ОТРА	T1	K90	P6	T2		
ОТРА	T2	K90	P5	T3		
ОТРА	T3	K0	P2	T4		
ОТРА	T2	K0	P1	T5		
ОТРА	T1	K180	P7	T1.1		
ОТРА	T1.1	K90	P8	T1.2		
РАСТ	C1	T12	T5	C1		Равно расстоянию между точками 1.2 и 5
ПЕПО	T1	K0	T12	C1	T6	Определяется T6 – точка пересечения прямой, проходящей через T1 под углом 0°, с окружностью с центром в T1.2 и радиусом C1

Блок описания контура

1; 2; 3; 4; 5T12 –; 6; @

10. Результаты расчета МГХ заданного ТНВ (точка O_3)

Величина	Метод "максимум–минимум"			Вероятностный метод		
	Номинальное значение	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение	Математическое ожидание	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение
M_3	355,69	0	3,561	357,47	–0,919	0,919
x_{c_3}	6,73	–0,014	0,015	6,73	–0,006	0,006
y_{c_3}	0,53	0	0,001	0,53	0	0
z_{c_3}	0		0	0		
$J_{x_{c_3}x_{c_3}}$	3157	–0,229	44,140	3179	–12,195	12,195
$J_{y_{c_3}y_{c_3}}$	3794	–6,614	57,800	3820	–13,773	13,773
$J_{z_{c_3}z_{c_3}}$	3145	–6,643	48,910	3166	–11,387	11,387

Промежуточные результаты расчета МГХ

4. Расчет МГХ 3D-мерных объектов

Рассмотрим 3D-мерные объекты, представляющие собой совокупность тел вращения, тел неполного вращения и тел переноса (назовем такие тела простыми). Объектом может быть деталь, которую можно расчленить на простые тела, объектом

может быть сборочная единица, состоящая из таких деталей и/или простых тел. Каждое из простых тел однозначно определяется плоским контуром. МГХ тел вращения вычисляют по программе MGH. Для тел переноса и тел неполного вращения методы расчета МГХ по определяющему их плоскому контуру приведены выше.

После вычисления МГХ каждое простое тело представляется в виде материальной точки, расположенной в центре масс тела. Координаты центра масс, в свою очередь, определяются структурой объекта в пространстве. В итоге получаем систему материальных точек, для которой по программе MGH вычисляют массово-геометрические характеристики.

В пространственных объектах могут быть отверстия, представляющие собой простые тела. Такие тела учитывают в расчетах МГХ заданием для них отрицательной плотности (для тел вращения и плоских тел) и массы/объема – для материальных точек.

Введем понятие базового тела. Базовое тело – это тело, собственную систему координат которого объявляют глобальной. Все другие тела (будем называть их дополнительными) расположены в глобальной системе относительно базового тела и имеют собственные системы координат.

Центры этих систем находят:

♦ для тел вращения (полного и неполного) – на оси вращения;

♦ для тел переноса – на одном из его конечных торцов.

Оси собственных систем координат направлены следующим образом:

• для тел вращения – ось y должна совпадать с осью вращения;

• для тел переноса – ось z должна быть параллельна линии переноса.

Метод расчета пространственных объектов состоит из следующих шагов.

Шаг 1. По программе MGH проводят автономные расчеты МГХ всех простых тел объекта и каждое из них заменяют материальной точкой, расположенной в его центре масс.

Шаг 2. По программе MGH вычисляются МГХ системы материальных точек.

Пример. Рассмотрим расчет МГХ пространственного объекта, представленного на рис. 5.

Объект состоит из двух простых тел: тела вращения – цилиндра (базовое тело) и тела переноса – П-образной плиты

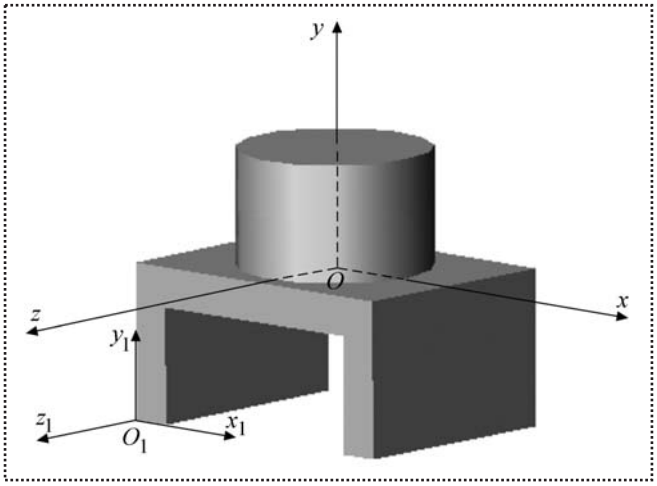


Рис. 5. Пространственный объект

(дополнительное тело). Цилиндр расположен на плите и его ось вращения проходит через точку пересечения диагоналей горизонтальной плоскости плиты. Глобальная система координат $Oxyz$ связана с цилиндром и ее центр лежит в центре нижнего основания цилиндра. Оси собственной системы координат $O_1x_1y_1z_1$ плиты имеют направления, совпадающие с направлениями глобальной системы координат, а ее центр расположен в левой нижней точке контура, образующего плиту (рис. 5), и имеет в глобальной системе координат следующие координаты (–2; –2; 1,5).

На рис. 6 изображены сечения заданного объекта плоскостями Oxz и Oyz с указанием его определяющих размеров. Численные значения этих размеров, блоки описания точек и блоки описания контуров приведены в исходных данных.

Исходные данные для расчета
Базовое тело – цилиндр (см. рис. 6, *а*):
Блок размеров и плотностей

1	*C*	1,25	0	0,01
2	*D*	1,5	0	0,01
1	П	1	0	0

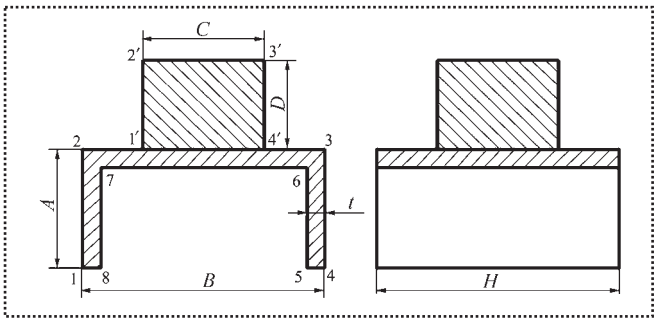


Рис. 6. Сечения пространственного объекта:
а – плоскостью xy; *б* – плоскостью zy; A, B, C, D, t – размеры объекта; 1–8, 1′–4′ – точки контура

Блок описания точек

НАЧК	Т1			
ОТРА	Т1	К90	Р2	Т2
ОТРА	Т2	К0	Р1	Т3
ОТРА	Т1	К0	Р1	Т4

Блок описания контура

1; 2; 3; 4; @

Дополнительное тело – плита (см. рис. 6, *а*)

Блок размеров и плотностей

1	*A*	2	0	0,015
2	*B*	4	0	0,015
3	*t*	0,5	0	0,005
4	*H*	3	0	0,015
1	П	1	0	0

Блок описания точек

НАЧК	Т1	–	–	–
ОТРА	Т1	К90	Р1	Т2
ОТРА	Т2	К0	Р2	Т3
ОТРА	Т3	К270	Р1	Т4
ОТРА	Т4	К180	Р3	Т5
ВЫЧ	С1	Р1	Р3	–
ОТРА	Т5	К90	С1	Т6
СЛОЖ	С2	Р3	Р3	–
ВЫЧ	С3	Р2	С2	–
ОТРА	Т6	К180	С3	Т7
ОТРА	Т7	К270	С1	Т8

Блок описания контура

1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; @

Результаты расчета представлены в табл. 11–13.

Как видно из последней табл. 13, центр масс объекта в глобальной системе координат, связанной с базовым телом (цилиндром), находится в точке (0; –0,091; 0). Следует также отметить, что при номинальных значениях параметров x_c и z_c, равных нулю, отклонения у них не нулевые (вследствие наличия отклонений у размеров объекта).

Расчеты МГХ пространственного объекта, изображенного на рис. 5, также были проведены и в программе AutoCAD (команда MASSPROP).

11. МГХ цилиндра – материальная точка 1 (шаг 1)

Величина	Метод "максимум–минимум"		Вероятностный метод		
	Номинальное значение	Верхнее отклонение	Математическое ожидание	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение
M_1	7,36	0,168	7,45	–0,036	0,036
x_{c_1}	0	0	0	0	0
y_{c_1}					
z_{c_1}					
x_{O_1}					
y_{O_1}	0,75	0,005	0,75	–0,001	0,001
z_{O_1}	0	0	0	0	0
$J_{x_{O_1}x_{O_1}}$	4,26	0,163	4,34	–0,035	0,035
$J_{y_{O_1}y_{O_1}}$	5,75	0,226	5,86	–0,053	0,053
$J_{z_{O_1}z_{O_1}}$	4,26	0,163	4,34	–0,035	0,035

Примечание. Нижнее отклонение для всех величин, вычисляемых по методу "максимум-минимум", равно нулю.

12. МГХ плиты – материальная точка 2 (шаг 1)

Величина	Метод "максимум–минимум"			Вероятностный метод		
	Номинальное значение	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение	Математическое ожидание	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение
M_2	10,50	0	0,212	10,6	–0,047	0,047
x_{O_2}	2,00		0,007	2,00	–0,002	0,002
y_{O_2}	1,32	–0,002	0,010	1,32	–0,003	0,003
z_{O_2}	1,50	0	0,008	1,50	–0,002	0,002
$J_{z_{O_2}Ox_{O_2}}$	21,87		0,598	22,17	–0,139	0,139
$J_{x_{O_2}Oy_{O_2}}$	7,88		0,240	7,99	–0,047	0,047
$J_{y_{O_2}Oz_{O_2}}$	3,54		0,126	3,60	–0,031	0,031
$J_{x_{O_2}x_{O_2}}$	29,75		0,838	30,16	–0,154	0,154
$J_{y_{O_2}y_{O_2}}$	11,42		0,366	11,60	–0,059	0,059
$J_{z_{O_2}z_{O_2}}$	25,41		0,724	25,77	–0,144	0,144

13. МГХ пространственного объекта (шаг 2)

Величина	Метод "максимума–минимума"			Вероятностный метод		
	Номинальное значение	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение	Математическое ожидание	Нижнее отклонение	Верхнее отклонение
M	17,86	0	0,380	18,05	–0,076	0,076
x_c	0		0,014	0	–0,003	0,003
y_c	–0,091	–0,007	0,019	–0,084	–0,004	0,004
z_c	0		0,014	0	–0,003	0,003
$J_{x_c x_c}$	24,52	–0,197	0,787	24,82	–0,131	0,131
$J_{y_c y_c}$	35,55	0	1,064	36,03	–0,243	0,243
$J_{z_c z_c}$	38,52	–0,197	1,143	38,99	–0,218	0,218

Следует отметить, что в AutoCAD нет возможности учитывать допуски на размеры, поэтому были получены значения МГХ только при номинальных значениях размеров элементов объекта. Эти результаты полностью совпадают с номинальными значениями МГХ, вычисленными по программе MGH.

Выводы

1. Рассмотрена методика расчета системы материальных точек, расположенных в 3D-пространстве.

2. Показана возможность проведения расчетов МГХ 3D-мерных объектов (тел переноса, тел неполного вращения и объектов, состоящих из таких тел) с использованием их плоских геометрических моделей, образующих объекты.

3. Все расчеты проведены с учетом допусков на размеры, определяющие объект, методом "максимум–минимум" и вероятностным методом.

4. Сравнение значений полей допусков МГХ по двум методам показывает, что вероятностный расчет уменьшает поле допуска, вычисленное методом "максимум–минимум", более чем в два раза.

5. Отклонения МГХ от номинальных значений (при расчете методом "максимум–минимум"), вызванные разбросом размеров объектов в поле допуска, могут достигать значительных величин. Например, в таблице расчета МГХ пространственного объекта (раздел 4) значение y_c имеет поле допуска, составляющее 29 % от номинального значения.

Список литературы

5. **Фаворин М.В.** Моменты инерции тел. Справочник. М., Машиностроение, 1977. 312 с.

6. **Ромашин В.Н.** Влияние полей допусков линейных и угловых размеров на дисбаланс центробежного вентилятора. Сборник "Автоматизация и прогрессивные технологии". Труды II Межвузовской отраслевой научно-технической конференции, часть 2. Новоуральск, НПИ, 1999. С. 79–81.

7. **Аввакумов В.Д.** Функциональная размерная параметризация в САПР. Известия Тульского государственного университета. Серия Машиностроение. Выпуск 6 (специальный). Сборник избранных трудов конференции "Автоматизация и информатизация в машиностроении 2000" (АИМ 2000). Тула: ТулГУ, 2000. С. 22–28.

8. **Аввакумов В.Д.** Применение метода Монте-Карло для решения вычислительных задач геометрического моделирования. Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике. Материалы VII Международной научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 2 февраля 2007 г.: В 2 ч. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. Ч. 1. С. 50–54.

Новая книга!

Волчкевич Л.И. **Автоматизация производственных процессов**: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 2007. 380 с.

Цена 308 руб. с НДС.

Пособие призвано дать будущим инженерам-машиностроителям комплекс знаний и умений по трем квалификационным уровням: 1) общей эрудиции, знанию материальной части; 2) вариантности технических решений, их сравнительному анализу и оценке; 3) синтезу технических решений, расчету и проектированию. Особое внимание обращено на выбор оптимальных структурно-компоновочных решений при проектировании машин-автоматов и их систем на этапе технического предложения.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению 651600 "Технологические машины и оборудование" специальности 120900 "Проектирование технических и технологических комплексов", может быть полезна инженерно-техническим работникам промышленных предприятий.

УДК 621.757

С.В. Толоконников, *канд. техн. наук,*
А.Н. Журавлев, *канд. техн. наук (ОАО "Волгабурмаш")*

Упорядоченная сборка опор скольжения буровых шарошечных долот

Рассмотрена упорядоченная сборка опор скольжения буровых нефтяных шарошечных долот, позволяющая обеспечить оптимальное заполнение изделия смазкой и тем самым повысить его эксплуатационные характеристики.

Эксплуатационно-технологическая оценка состояния бурового оборудования зависит от стабильности показателей технического состояния соединений нового бурового долота, которое оказывает существенное влияние на достоверность прогнозирования его работоспособности при эксплуатации.

Недостаток существующих технологий сборки опор скольжения буровых шарошечных нефтяных долот состоит в преобладающем влиянии случайных факторов, таких как отклонения реального профиля поверхностей (которые характеризуют макроотклонениями, упругими свойствами и др.) на стабильность показателей соединений. Это приводит к неопределенности оценок технического состояния многоопорных изделий. Многоопорные изделия должны характеризоваться одинаковой работоспособностью всех опор, а это может быть получено, если уменьшить влияние случайного фактора на динамические показатели опор скольжения.

Современные конструкции нефтяных буровых долот (рис. 1) имеют герметизированные эластомерным уплотнительным кольцом (УК) *1* гидромониторные опоры скольжения типа ГАУ, ЦГАУ и ЦАУ (здесь приняты следующие сокращения: Ц и Г – долото с центральной или боковой промывкой соответственно, А – опора на двух или более подшипниках скольжения, У – герметизация опоры с маслонаполнением). Их узел скольжения включает цапфу (Ц) *2*, радиальную плавающую разрезную втулку скольжения (ВС) *3* и упорную шайбу (УШ) *4* из бериллиевой бронзы, шариковый подшипник качения *5* и малый подшипник скольжения *6*.

Опоры скольжения включают в себя большое количество соединений: подвижных и неподвижных, торцовых (Т), сферических (СФ) и цилиндрических (ЦЛ). Для торцовых соединений различают левую (Л) и правую (П) стороны.

Опыт эксплуатации таких изделий выявил, что доминирующей причиной отказа являются разрушения опор скольжения и их деталей, имеющие случайный характер.

Известно, что работоспособность изделия формируется на всех этапах его жизненного цикла, включая механическую обработку, сборку и эксплуатацию. В настоящее время цикл механообработки долотного производства полностью сертифицирован и включает 100 % входной и межоперационный контроль качества комплектующих деталей опор скольжения. Это гарантирует стабильные показатели качества деталей в заданных конструктором пределах.

Цикл эксплуатации регламентируют режимами эксплуатации в пределах допустимых нагрузок. И только в циклах сборочного производства, существенно зависящего от случайных процессов, от-

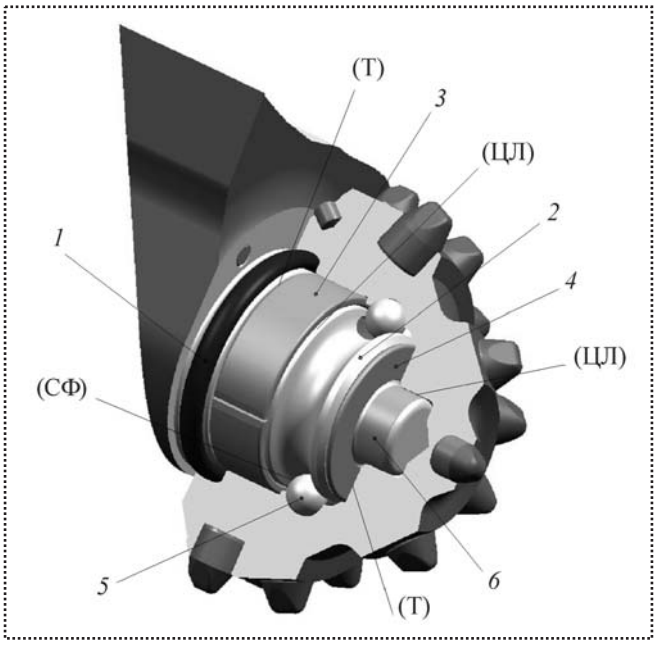


Рис. 1. Опора скольжения бурового долота

сутствуют системные технологии распознавания состояний узловой и общей сборки изделий по динамическим свойствам подвижных соединений.

Технология должна обеспечить стабильность показателей качества опор скольжения. Решение этой задачи связано с разработкой научно обоснованных технологических методов упорядоченной сборки подвижных соединений. Если при этом учитывать индивидуальные динамические свойства подвижных соединений, то будет устранена основная причина нестабильного качества сборки многоопорных изделий.

Статистический анализ указывает на то, что использование только геометрических параметров разрезной втулки является необходимым, но не достаточным условием гарантии стабильности качества подвижного соединения. Это связано с тем, что при сборке не учитывают ряд дестабилизирующих факторов F:

$$F = (t(\tau), h(\tau), \Delta_{\text{вз}}, \Delta_{\text{ф}}^{\text{пр}}, \Delta_{\text{ф}}^{\text{поп}}, M, \sigma, \alpha, V(\tau, \varphi), p(\tau, \varphi), M_{\text{а}}(\tau), D_{\text{а}}(\tau), T(\tau), M_{\text{кр}}(\tau)), \quad (1)$$

где t – толщина втулки скольжения (ВС);

h – ширина паза втулки скольжения;

$\Delta_{\text{вз}}$, $\Delta_{\text{ф}}^{\text{пр}}$ и $\Delta_{\text{ф}}^{\text{поп}}$ – погрешности взаимного расположения и формы в продольном и поперечном сечениях деталей соответственно;

M, σ и α – соответственно математическое ожидание, среднее квадратическое отклонение и эксцесс динамических показателей взаимодействия подвижных соединений (ВС–Ц);

V – объем закачанной смазки, $V = (84...87)\times \times 10^{-6}$ м^3;

p – максимальное давление смазки при закачке, $p = 2250...2350$ кПа;

φ – угловое положение паза втулки относительно каналов смазки;

$M_{\text{а}}$ и $D_{\text{а}}$ – статистические параметры функции зазоров $f(a)$ на этапе сборки;

T – средняя температура в опоре;

$M_{\text{кр}}$ – крутящий момент;

τ – время.

В целях повышения стабильности эксплуатационных параметров разработана технология упорядоченной сборки подвижных соединений опор скольжения. Определяющую роль в работоспособности этих конструкций играет разрезная втулка скольжения. Поэтому разработанная методика включает процесс формирования такого подвижного соединения, которое бы учитывало полный набор факторов, отвечающих за стабильность работы таких изделий.

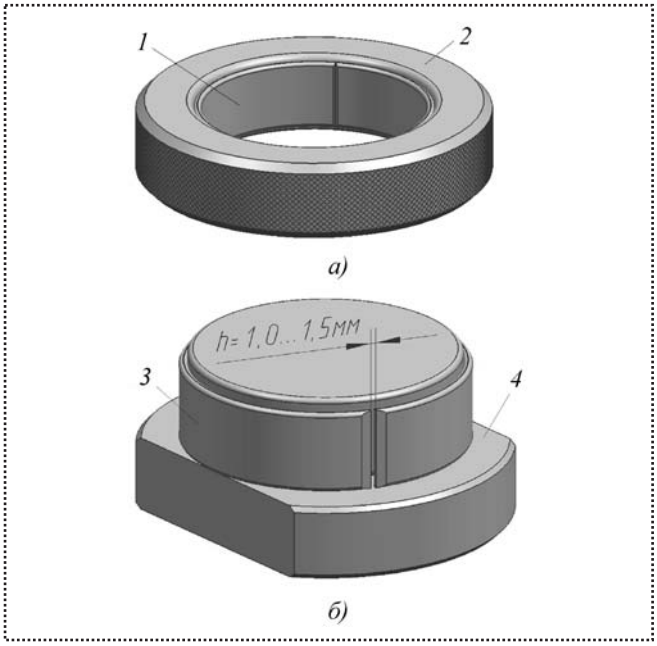


Рис. 2. Контроль втулки на собираемость с шарошкой: *а* – по калибрующему кольцу; *б* – по величине паза

Обычно качество соединения определяют в одном случае по собираемости втулки *1* с калибрующим кольцом *2* 5-го квалитета точности (рис. 2, *а*), а в другом – по величине паза h втулки *3*, установленной на валик *4* (рис. 2, *б*). Как показывает практика сборки опор скольжения, эти геометрические показатели качества не гарантируют стабильность кинематических связей цилиндрического соединения (ВС–Ц).

Кроме того, проводимая селективная компьютерная сборка деталей опор скольжения по геометрическим параметрам [1], не позволяет в полной мере учитывать погрешности изготовления деталей.

Основным критерием качества выполнения селективной компьютерной сборки по [1] является параметр ΔR, характеризующий разность действительных радиальных зазоров по концевому (КП) и периферийному (ПП) подшипникам:

$$\Delta R = [\Delta_{\text{д(кп)}} - \Delta_{\text{д(пп)}}], \quad (2)$$

где $\Delta_{\text{д(кп)}}$ – действительный радиальный зазор в концевом подшипнике;

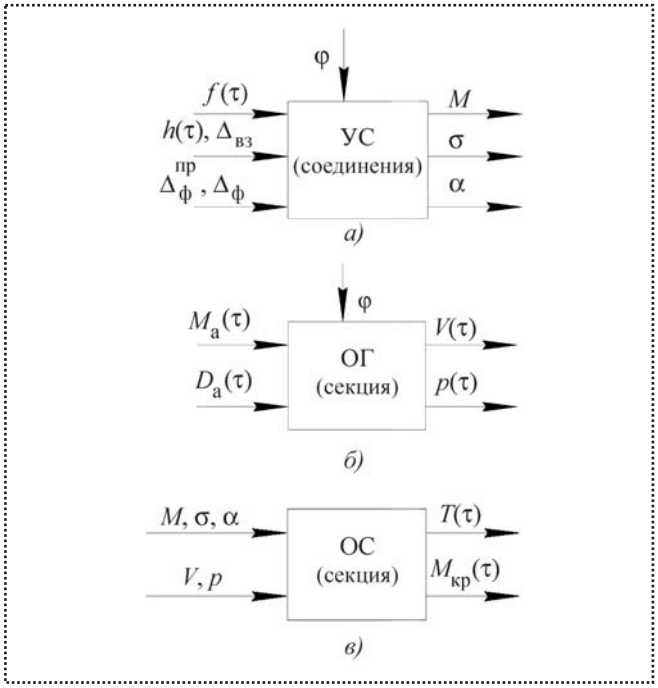


Рис. 3. Схемы взаимосвязи параметров качества:
а – для узловой сборки; *б* – для операции герметизации; *в* – для общей сборки

$\Delta_{д(пп)}$ – действительный радиальный зазор в периферийном подшипнике.

Для долот типа ЦГАУ, ГАУ, ЦАУ необходимо обеспечить сборку в диапазоне $-0{,}02 < \Delta R < +0{,}01$ мм.

Для опор с плавающей втулкой (ВС), в случае выхода отклонений ΔR от номинального значения за пределы интервала (–0,02...+0,01 мм), необходимо подобрать втулки из селективных групп.

В целях обеспечения стабильности исследована технология селективной сборки подвижных соединений опор скольжения и выделены признаки, обусловленные упорядоченной сборкой.

Многоэтапная селекция предполагает обеспечение параметров качества на этапах узловой (УС) и общей (ОС) сборки и операции герметизации (ОГ). При этом процесс упорядоченной сборки является преобразователем входных данных в выходные параметры соединения с учетом управляющих воздействий. Поэтому каждому этапу сборки ставят в соответствие его выходные параметры качества. Такие композиционные схемы (рис. 3) наглядно иллюстрируют указанные взаимосвязи входных, выходных и управляющих параметров качества.

1. Параметры качества упорядоченной сборки опор скольжения

Этапы	Параметры		
	Входные	Управляющие	Выходные
УС	h, $\Delta_{вз}$, $\Delta_ф^{пр}$, $\Delta_ф^{ппр}$	φ	M, σ, α
ОГ	M_a, D_a		V, p
ОС	M, σ, α, V, p	–	T, $M_{кр}$

Рассматриваемые параметры качества упорядоченной сборки опор скольжения представлены в табл. 1.

В связи с этим формулируют задачу исследования динамических свойств соединения втулка – цапфа (ВС–Ц) для определения необходимого и достаточного числа признаков упорядоченной сборки опор скольжения. Это исследование содержит натурные испытания по распознаванию устойчивых траекторий и выполняется на динамической модели, раскрывающей кинематические взаимосвязи подвижной втулки с неподвижной дорожкой опоры скольжения [2].

Для использования полученных закономерностей [3] на этапе герметизации необходимо провести экспериментальное исследование по определению взаимосвязи положения паза относительно каналов смазки в цапфе во время закачки смазки в подвижные соединения опор скольжения. В задачу исследования входит оценка стабильности качества закачки смазки на этапе герметизации опор скольжения. Оценочными параметрами стабильности закачки при этом выступают объем V закачанной смазки и максимальное значение давления p смазки.

Упорядоченную сборку на операции герметизации (ОГ) осуществляют при помощи разработанного метода зонного позиционирования путем направленного ориентирования паза втулки относительно каналов смазки.

Эксперимент предполагает включение последовательных дополнительных операций в базовую технологию сборки на всех этапах упорядоченной сборки секции долота:

а) соединение шарошки с втулкой скольжения (ВС). При этом паз втулки ориентирован в угловом положении между двумя любыми твердосплавны-

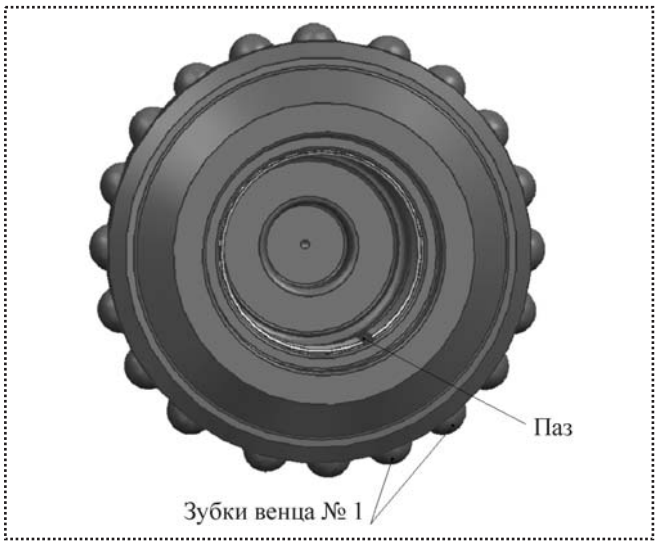


Рис. 4. Ориентация паза втулки относительно метки на шарошке

ми зубками венца № 1 (рис. 4) и удерживается в шарошке за счет упругих свойств разрезной втулки скольжения,

б) установка на конусе венца № 1 шарошки метки краской относительно паза втулки, которая указывает положение паза втулки в шарошке на этапе узловой сборки (УС) соединения,

в) сборка секции долота по базовому технологическому процессу, установка уплотнительного кольца (УК) в предварительно собранный первый комплект: втулка скольжения (ВС) – шарошка.

Установка упорной шайбы (УШ) на торце цапфы лапы, формирование второго комплекта. Сборка из двух комплектов предварительно собранной опоры скольжения. Далее – закладка в отверстие замкового пальца шариков, после чего установка замкового пальца и выполнение операции предварительной сварки. Далее проверка качества соединения по значению крутящего момента на специальном стенде.

После этого собранные в количестве 30 штук секции группируют на 6 групп (по пять штук в каждой группе). Наносят на каждую из пяти секций в группе краской номер группы. Таким образом, секции первой группы будут иметь № 1, второй – № 2 и т.д. Внутри группы секции не различаются. В протоколе испытаний каждая группа будет отличаться угловой ориентацией паза втулки относительно каналов смазки на цапфе.

ГРУППУ № 1 собранных опор пяти секций характеризуют отличительными признаками упоря-

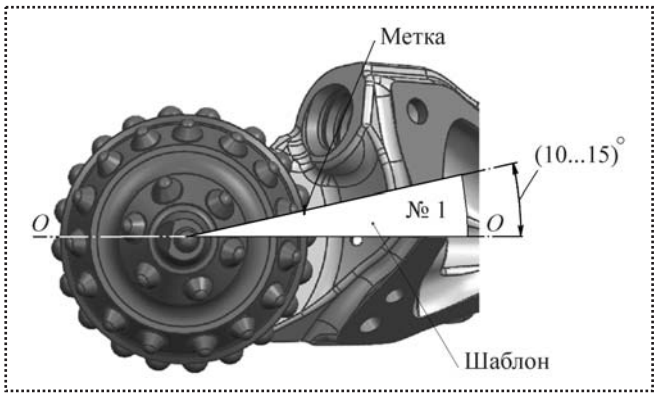


Рис. 5. Ориентация метки шарошки первой группы

доченной сборки, включая следующие вспомогательные переходы.

А. Установка шарошки меткой в диапазон 10...15° относительно оси симметрии *O–O* двугранного угла лапы против часовой стрелки, используя шаблон № 1 (рис. 5). Это соответствует первой зоне динамического взаимодействия подвижных соединений, рассмотренной в работе [3].

Б. Нанесение краской метки на лапе относительно метки на шарошке. Тем самым, фиксируют выбранное угловое положение паза втулки относительно каналов смазки на цапфе, угловая ориентация которых задана в конструкции лапы.

В. Заполнение смазкой секций долот по базовой технологии на автоматической смазочной машине модели AGM-3. Данная машина позволяет контролировать величины объема и давления закачиваемой в секцию смазки.

Заполнение смазочной системы долота смазкой производят по одному из двух вариантов:

1-й вариант: через отверстие лапы с конической резьбой 1/8″ – 27NPTF;

2-й вариант: через отверстие в крышке смазочного резервуара с конической резьбой 1/8″ – 27NPTF.

Г. В процессе герметизации по приборам смазочной машины фиксируют параметры состояния масляного слоя в опорах по величине объема V (табл. 2) и давления p (табл. 3) в опорах для каждой из пяти секций группы № 1.

ДЛЯ ГРУПП № 2 – 6 устанавливают шарошку меткой соответственно в диапазоны 165...170°, 35...40°, 85...90°, 30...40° и 130...140° относительно оси *O–O* двугранного угла лапы по часовой стрелке. При этом используют шаблоны № 2 – № 6.

Аналогично группе № 1 фиксируют в табл. 2 величину объема V смазки и в табл. 3 максимальное значение давления p в опоре для каждой из пяти секций указанных групп.

Для оценки стабильности качества упорядоченной сборки на этапе герметизации тридцати опор скольжения долот по параметрам объема V и давления p представим полученные данные табл. 2 и 3 в виде диаграмм рис. 6, *а* и 6, *б* соответственно.

На диаграммах можно выделить группу № 3 упорядоченной сборки, состоящую из 5 секций долот, как наиболее стабильную по показателям объема V и давления p закачанной в них смазки. Данный факт указывает на то, что процесс закачки

2. Объем закачанной смазки $V \times 10^{-6}$, м^3

Номера секций	Номера групп узловых сборок					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
1	84,7	86,3	86,1	85,2	85,3	86,0
2	84,2	86,0	85,6	85,8	85,6	85,3
3	85,1	85,6	85,9	86,6		86,4
4	86,0	85,7	86,2		84,2	85,2
5	86,1	86,3	85,3	86,0	85,7	86,0

3. Максимальное значение давления p смазки при закачке, кПа

Номера секций	Номера групп узловых сборок					
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6
1	2334,0	2304,6	2314,4	2206,5	2314,4	2294,8
2	2363,4	2334,0			2324,2	2275,1
3	2343,8	2324,2	2343,8	2304,6		2294,8
4	2353,6	2284,9	2324,2	2324,2	2353,6	2334,0
5	2363,4	2314,4		2206,5	2265,3	2255,5

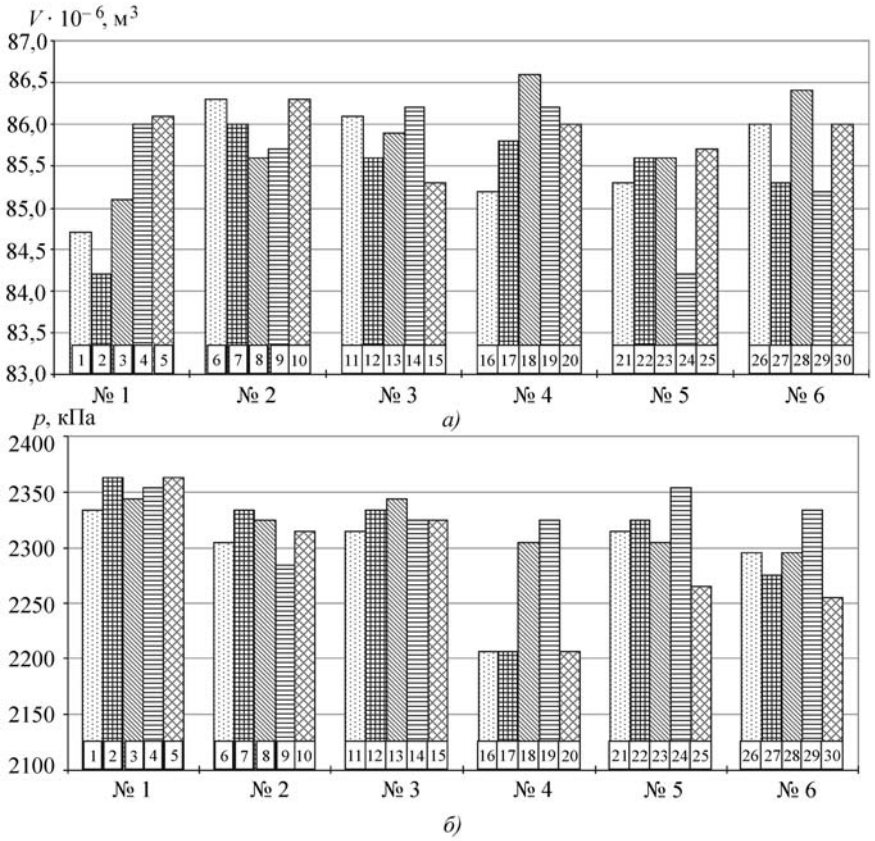


Рис. 6. Оценка стабильности качества упорядоченной сборки на этапе герметизации опор скольжения бурового долота 215,9 ТЗ–ГАУ–R437B:
а – по объему закачанной смазки, V; *б* – по максимальному давлению смазки при закачке, p

при нахождении паза втулки в зоне 3 носит наиболее стабильный характер по отношению к остальным зонам динамического взаимодействия с ориентацией паза втулки скольжения (ВС) относительно каналов смазки цапфы (Ц) [3], обеспечивая тем самым, равномерное распределение слоя смазки по подвижным соединениям опоры.

Выводы

1. Разработанный метод зонного позиционирования на операции герметизации при заполнении смазкой подвижных соединений опор скольжения буровых долот, заключающийся в начальной ориентации паза втулки скольжения относительно каналов для смазки в цапфе при упорядоченной сборке секции, позволяет стабилизировать условия смазывания поверхностей трения опор во время их герметизации.

2. Разработана технология упорядоченной сборки опор скольжения долота согласно которой паз втулки должен находиться в зоне 3 устойчивого положения втулки, соответствующей диапазону (35...40)° относительно оси симметрии *О–О* двугранного угла лапы против часовой стрелки.

3. Получены положительные результаты по стабилизации параметров герметизации опор скольжения на этапах упорядоченной сборки применительно к тяжело нагруженным изделиям машиностроения.

Список литературы

1. **Морозов Л.В., Богомолов Р.М.** Селективная компьютерная сборка буровых шарошечных долот // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 6. С. 34–38.

2. **Толоконников С.В., Рыльцев И.К.** Обеспечение стабильности технологических показателей качества многорядных подшипников скольжения // Вестник Курганского университета. Сер. Технические науки. Вып. 2. Ч. 1. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. 2006. С. 118–119.

3. **Толоконников С.В.** Исследование динамических свойств опор скольжения // Вест. Самар. гос. техн. ун-та. Вып. 41. Сер. Техн. науки. Самара: Самар. гос. техн. ун-т. 2006. С. 142–147.

В.Б. Тарабарин, *канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

Промышленные роботы и манипуляторы. *Продолжение**

Рассмотрены общие вопросы структуры, геометрии и кинематики манипуляторов. Дана общая классификация промышленных роботов, приведены основные понятия и определения, сформулированы основные задачи механики манипуляторов. Кратко рассмотрены вопросы кинематического и динамического анализов манипуляторов, их статическое уравновешивание.

The common questions of structure, geometry and kinematics of manipulators are considered. The common classification of industrial robots is given, the basic concepts and definitions are resulted and the primary problems of mechanics of manipulators are formulated. Questions of the kinematics and dynamic analysis of manipulators, their static equilibration are briefly considered.

Задачи механики манипуляторов

К основным задачам механики манипуляторов можно отнести:

- разработку методов синтеза и анализа исполнительных механизмов (включая механизмы приводов);
- программирование движения манипулятора;
- расчет управляющих сил и реакций в кинематической паре (КП);
- уравновешивание механизмов манипуляторов;
- другие задачи.

Эти задачи решают на базе общих методов исследования структуры, геометрии, кинематики и динамики систем с пространственными многоподвижными механизмами. Каждая из рассматриваемых задач может быть сформулирована как прямая (задача анализа) или как обратная (задача синтеза).

В **прямой задаче** при определении функций положения механизма находят закон изменения абсолютных координат выходного звена по заданным законам изменения относительных или абсолютных координат звеньев. В **обратной** – по заданному закону движения схвата находят законы изменения координат звеньев, обычно линейных или угловых перемещений в приводах.

Решение обратной задачи, или задачи синтеза, более сложно, так как часто она имеет множество допустимых решений, из которых необходимо выбрать оптимальное. В *обратной задаче кинематики* по требуемому закону изменения скоростей и ускорений выходного звена определяют соответствующие законы изменения скоростей и ускорений в приводах манипулятора. *Обратная задача динамики* заключается в определении закона изменения управляющих сил и моментов в приводах, обеспечивающих заданный закон движения выходного звена.

Кинематический анализ механизма манипулятора

Первая и основная задача кинематики – определение функции положения. Для пространственных механизмов наиболее эффективными методами решения этой задачи являются *векторный метод* и *метод преобразования координат*. При решении прямой задачи о положении схвата манипулятора обычно используют метод преобразования координат. Из множества методов преобразования координат [1, 2], которые отличаются друг от друга правилами выбора осей локальных систем координат, для манипуляторов обычно используют метод Денавита и Хартенберга.

Опишем два вида матриц:

♦ матрицы M, определяющие отношение между системами координат соседних звеньев;

♦ матрицы T, определяющие положение и ориентацию каждого звена механизма в неподвижной (или базовой) системе координат.

Воспользуемся однородными координатами трехмерного проективного пространства PR^3, в которых движение евклидова пространства R^3 можно представить линейным преобразованием

$$\bar{r}_i = M_{ij}\bar{r}_j ,$$

где M_{ij} – матрица 4×4 вида $\begin{vmatrix} U_{ij} & b \\ 000 & 1 \end{vmatrix}$.

Это преобразование эквивалентно преобразованию в эвклидовом пространстве $\bar{r}_i = U_{ij}\bar{r}_j + b$, где

* Начало см. журнал "Сборка в машиностроении, приборостроении", № 5, 2008.

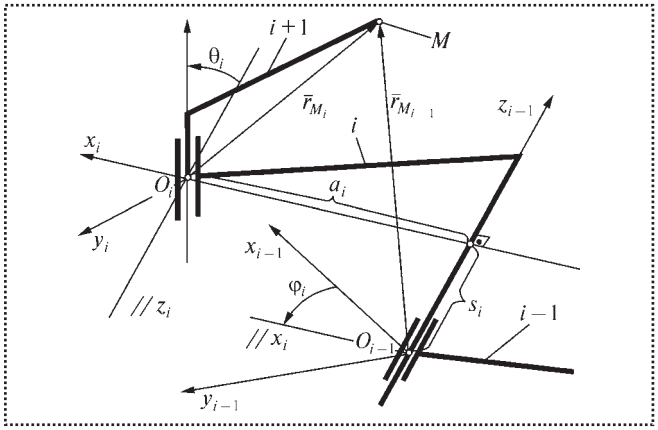


Рис. 9. Схема перехода из системы координат звена *i* в систему координат звена *i*–1

$[\bar{r}_i, \bar{r}_j] \in R^3$, т.е. преобразованию, которое включает поворот, определяемый матрицей U_{ij} размерностью 3×3, и параллельный перенос, задаваемый вектором $\bar{b}$ размерностью 3. В однородном пространстве положение точки будут определять не три координаты x, y и z, а четыре: x', y', z' и t', которые удовлетворяют следующим соотношениям:

$$x = x'/t', \; y = y'/t', \; z = z'/t'.$$

Обычно принимают $t' = 1$. У матрицы поворота U_{ij} элементами u_{ij} являются направляющие косинусы углов между новой осью i и старой осью j. Вектор $\bar{b} = (x, y, z)$ – трехмерный вектор, определяющий положение начала новой системы координат i в старой системе j. Выбор расположения осей должен соответствовать решаемой задаче.

При решении задачи о положениях необходимо в *прямой задаче* определить положение выходного звена как функцию перемещений в приводах, в *обратной* – заданное положение выходного звена представить как функцию перемещений в приводах.

Выбор расположения и ориентации локальных систем координат должен обеспечивать выполнение этих задач. При использовании метода Денавита и Хартенберга оси координат располагают по следующим правилам:

1. Для звена i ось z_i направляют по оси кинематической пары, образуемой им со звеном (i+1). Начало координат размещают в геометрическом центре этой пары.

2. Ось x_i направляют по общему перпендикуляру к осям z_{i-1} и z_i с направлением от z_{i-1} к z_i. Если оси z_{i-1} и z_i совпадают, то x_i перпендикулярна к ним и направлена произвольно. Если они пересекаются в центре кинематической пары, то начало координат располагают в точке пересечения, а ось x_i направляют по правилу векторного произведения $\bar{x}_i = \bar{z}_i \times \bar{z}_{i-1}$ (кратчайший поворот оси z_i до совмещения с z_{i-1} при наблюдении с конца x_i должен происходить против часовой стрелки).

3. Ось y_i направляют так, чтобы система координат была правой.

В прямой задаче необходимо определить положение схвата манипулятора и связанной с ним системы координат $Mx_ny_nz_n$ по отношению к неподвижной (или базовой) системе координат $Ox_0y_0z_0$. Это осуществляют последовательными переходами из системы координат звена i в систему координат звена i–1. Согласно принятому методу, каждый переход включает в себя последовательность четырех движений: двух поворотов и двух параллельных переносов, осуществляемых в указанной последовательности (рис. 9):

- поворот i-й системы вокруг оси x_i на угол $-\theta_i$ до параллельности осей z_i и z_{i-1} (положительное направление поворота при наблюдении с конца вектора x_i против часовой стрелки);
- перенос вдоль оси x_i на величину $-a_i$ до совмещения начала системы координат O_i с точкой пересечения осей x_i и z_{i-1} (отсчет по оси x_i от точки пересечения осей x_i и z_{i-1});
- перенос вдоль оси z_{i-1} на величину $-s_i$, после которого начало системы координат O_i оказывается в начале координат O_{i-1} системы (i–1) (отсчитывают по оси z_{i-1} от ее начала координат O_{i-1} до точки ее пересечения с осью x_i);
- поворот вокруг оси z_{i-1} на угол $-\varphi_i$ до тех пор, пока ось x_i не станет параллельной оси x_{i-1} (положительное направление поворота при наблюдении с конца вектора z_{i-1} против часовой стрелки).

Необходимо отметить, что знак угла поворота не имеет значения, так как в матрицах перехода используют направляющие косинусы (четные функции). Целесообразно рассматривать угол, обеспечивающий кратчайший поворот оси старой системы i до совмещения (параллельности) с соответствующей осью новой (i–1). Перемещения начала координат определяют как координаты начала старой системы O_i в новой O_{i-1}.

В манипуляторах обычно используют одноподвижные кинематические пары или вращательные,

или поступательные. Оба относительных движения, как вращательное, так и поступательное, реализуют в цилиндрических парах. Поэтому при общем представлении механизма используют цилиндрические пары.

Матрицы перехода из системы O_i в систему O_{i-1} можно записать

$$M_i = M_i^{\theta} M_i^{a} M_i^{s} M_i^{\varphi},$$

где $M_i^{\theta} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 \\ 0 & \sin\theta_i & \cos\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – матрица поворота вокруг оси x_i на угол $-\theta_i$;

$M_i^{a} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – матрица переноса вдоль оси x_i на $-a_i$;

$M_i^{s} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & s_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – матрица переноса вдоль оси z_{i-1} на $-s_i$;

$M_i^{\varphi} = \begin{vmatrix} \cos\varphi_i & -\sin\varphi_i & 0 & 0 \\ \sin\varphi_i & \cos\varphi_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – матрица поворота вокруг оси z_{i-1} на угол $-\varphi_i$.

В этих матрицах переменные s_i и φ_i соответствуют относительным перемещениям звеньев в КП и являются обобщенными координатами манипулятора, определяющими конфигурацию механизма в рассматриваемом положении. Переменные a_i и θ_i определяют конструктивным исполнением звеньев манипулятора, в процессе движения они остаются неизменными.

Положение некоторой произвольной точки M в системе координат звена i определяют вектором $\bar{r}_{M_i}$, а в системе координат звена (i–1) – вектором $r_{M_{i-1}}$. Эти радиусы связаны между собой через матрицу преобразования координат M_i следующим уравнением:

$$\bar{r}_{M_{i-1}} = M_i \bar{r}_{M_i},$$

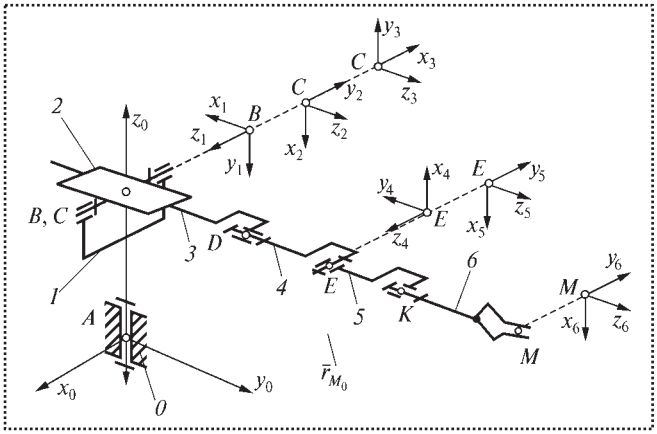


Рис. 10. Ориентация систем координат звеньев по методу Денавита и Хартенберга

где

$$M_i = \begin{vmatrix} \cos\varphi_i & -\cos\theta_i \sin\varphi_i & \sin\varphi_i \sin\theta_i & a_i \cos\varphi_i \\ \sin\varphi_i & \cos\theta_i \cos\varphi_i & -\cos\varphi_i \sin\theta_i & a_i \sin\varphi_i \\ 0 & \sin\theta_i & \cos\theta_i & s_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} -$$

матрица перехода из i-й системы координат в (i–1)-ю.

Рассмотрим шестиподвижный манипулятор в исходном или начальном положении (рис. 10). За начальное положение принимают такое, в котором все относительные обобщенные координаты равны нулю. Переход из системы координат любого i-го звена к неподвижной (или базовой) системе записывают в виде

$$\bar{r}_{M_0} = M_1 M_2 \ldots M_i \bar{r}_{M_i} \text{ или } \bar{r}_{M_0} = T_i \bar{r}_{M_i},$$

где $T_i = M_1 M_2 \ldots M_i$ – матрица преобразования координат i-й системы координат в координаты базовой системы.

Для схемы, изображенной на рис. 10, радиус $\bar{r}_{M_6} = 0$, а радиус $\bar{r}_{M_0}$ определяют по формуле

$$\bar{r}_{M_0} = T_n = T_6,$$

т.е. положение выходного звена манипулятора описывают матрицей T_n. Элементы этой матрицы определяют положение центра схвата точки M и его ориентацию в пространстве. Элементы четвертого столбца – это декартовы координаты точки M (проекции вектора r_{M_0} на оси координат). Третий столбец содержит направляющие косинусы оси z_n системы координат, связанной со схватом, или вектора подхода $\bar{A}$, который характеризует направление губок схвата (рис. 11).

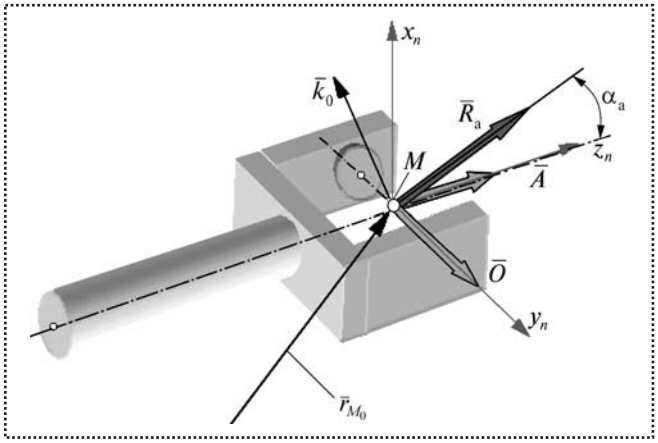


Рис. 11. Схват манипулятора и векторы его ориентации

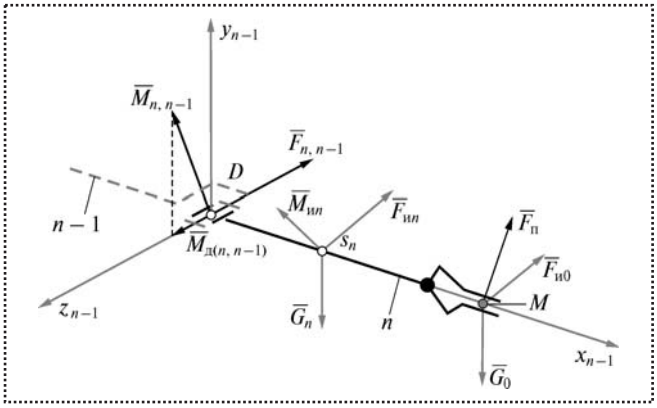


Рис. 12. Расчетная схема к силовому расчету звена манипулятора

Второй столбец определяет направление оси y_n или вектора ориентации $\bar{O}$, который проходит через центр схвата по оси, перпендикулярной рабочим поверхностям его губок. В первом столбце содержатся направляющие косинусы оси x_n или вектора $(\bar{O} \times \bar{A})$.

Углом подхода схвата α называют угол между вектором подхода $\bar{A}$ и базовым вектором:

$$R_\alpha = (\bar{O} \times \bar{k}_0),$$

где $\bar{k}_0$ – орт вектора $\bar{z}_0$ неподвижной (или базовой) системы координат. С учетом сказанного, матрица T_n может быть представлена в виде

$$T_n = \begin{vmatrix} (\bar{O} \times \bar{A})_x & O_x & A_x & r_{nM_x} \\ (\bar{O} \times \bar{A})_y & O_y & A_y & r_{nM_y} \\ (\bar{O} \times \bar{A})_z & O_z & A_z & r_{nM_z} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

В результате матричных преобразований получаем радиус-вектор точки M схвата в функции обобщенных координат. Обычно за обобщенные координаты принимают линейные и угловые перемещения в кинематических парах или на выходных валах приводов манипулятора. В механизме с n подвижностями в общем виде функцию положения схвата можно записать:

$$\bar{r}_{OM} = T_n \bar{A} = \bar{\Pi}(q_1, q_2, ..., q_n),$$

где $q_1, q_2, ..., q_n$ – обобщенные координаты манипулятора.

При кинематическом анализе манипулятора в прямой задаче необходимо определить линейные и угловые скорости и ускорения схвата при заданных угловых и линейных обобщенных скоростях и ускорениях (обычно относительных скоростях и ускорениях в кинематических парах механизма).

В обратной задаче по заданному закону изменения скоростей и ускорений схвата определяют законы изменения скоростей и ускорений в КП или на выходных звеньях приводов. Решение прямой задачи кинематики для точки M схвата можно получить продифференцировав четвертый столбец матрицы T_n по времени:

$$r_{nM} = \begin{vmatrix} r_{nM_x} \\ r_{nM_y} \\ r_{nM_z} \\ 1 \end{vmatrix}; \; V_{nM} = \frac{dr_{nM}}{dt} = \begin{vmatrix} V_{nM_x} \\ V_{nM_y} \\ V_{nM_z} \\ 1 \end{vmatrix};$$

$$a_{nM} = \frac{d^2 r_{nM}}{dt^2} = \begin{vmatrix} a_{nM_x} \\ a_{nM_y} \\ a_{nM_z} \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Угловую скорость и угловое ускорение схвата можно определить векторным суммированием относительных угловых скоростей во вращательных КП механизма. Так как векторы угловых скоростей при данном выборе ориентации осей координат совпадают с осью z, то угловая скорость схвата

$$\bar{\omega}_n = \sum_{i=1}^{m} \bar{k}_{i-1} \omega_{i,i-1},$$

где $\bar{k}_{i-1}$ – орт оси z системы координат, расположенной в центре КП, соединяющей звено i и звено i–1;

m – число вращательных КП в механизме.

Дифференцируя это выражение по времени, получим формулу для определения углового ускорения схвата:

$$\bar{\varepsilon}_n = \sum_{i=1}^{m} \bar{k}_{i-1} \varepsilon_{i,i-1} + \sum_{j=2}^{m} \left[\left(\sum_{k=l-1}^{m-1} \bar{k}_{k-1} \omega_k \right) (\bar{k}_{j-1} \omega_j) \right].$$

Динамика манипуляторов промышленных роботов

Силовой расчет манипулятора

Из большого разнообразия задач динамики манипуляторов рассмотрим две: *силовой расчет* и *расчет быстродействия* промышленного робота. При **силовом расчете** решают задачу по определению внешних силовых управляющих воздействий, которые обеспечивают требуемый закон движения механизма, и задачу по расчету реакций в кинематических парах.

Первую часть часто называют задачей синтеза управления. При силовом расчете обычно применяют метод кинетостатики, основанный на принципе Д'Аламбера. По этому методу к внешним силам и моментам, приложенным к звеньям механизма, добавляют расчетные силы инерции, которые обеспечивают силовую уравновешенность системы и позволяют рассматривать подвижную систему в квазистатическом равновесии, т.е. как условно неподвижную.

Силовой расчет выполняют при заданной полезной нагрузке $\bar{F}_п$, известных законах движения $\bar{a}_{si}$ и $\bar{\varepsilon}_i$ звеньев (из предварительного кинематического расчета), известных инерционных характеристиках звеньев: массах звеньев m_i и их моментах инерции J_{si}. По этим данным определяют главные векторы $\bar{F}_{ии} = -m\bar{a}_{si}$ и главные моменты $\bar{M}_{ии} = -J_{si}\bar{\varepsilon}_i$ сил инерции для каждого из звеньев механизма.

Для открытой кинематической цепи решение начинают с выходного звена – схвата. Отброшенные связи звена *n* со звеном *n*–1 и выходным валом привода звена *n* заменяют реакциями $\bar{M}_{n,n-1}$ и $\bar{F}_{n,n-1}$ и составляют кинетостатические векторные уравнения равновесия сил и моментов для звена *n* (рис. 12):

$$\bar{G}_0 + \bar{G}_n + \bar{F}_{ип} + \bar{F}_{и0} + \bar{F}_{n,n-1} + \bar{F}_п = 0,$$

$$\bar{M}(\bar{G}_n) + \bar{M}(\bar{G}_0) + \bar{M}(\bar{F}_{ип}) + \bar{M}(\bar{F}_{и0}) + \\ + \bar{M}_{ип} + \bar{M}_{n,n-1} + \bar{M}(\bar{F}_п) = 0,$$

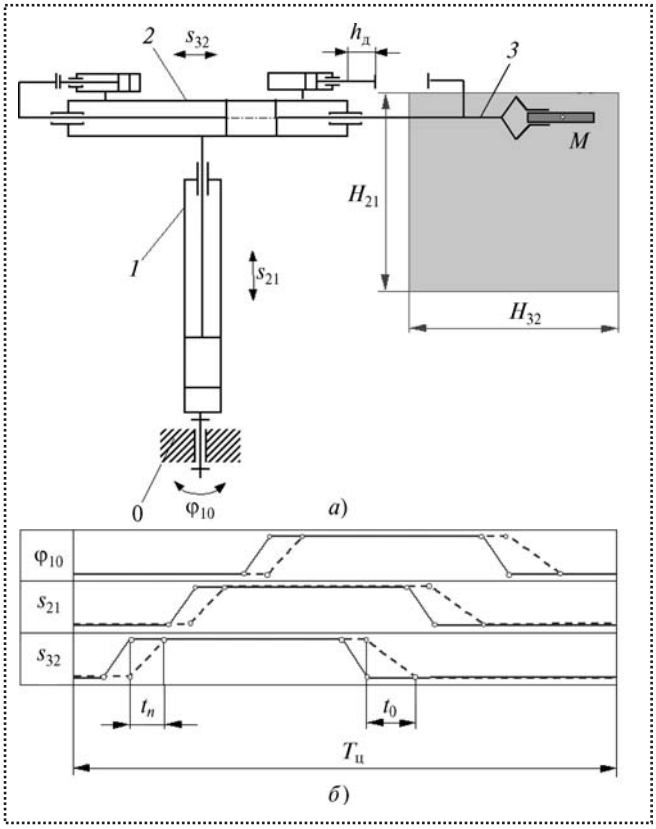


Рис. 13. Структурная схема (*а*) манипулятора и циклограммы (*б*) пневматического промышленного робота ПР5–2:
H_{21} – полный ход звена *2* относительно звена *1*; H_{32} – полный ход звена *3* относительно звена *2*; $h_д$ – ход демпфера; φ_{10} – угловое перемещение звена *1* относительно звена *0*; s_{21} – линейное перемещение звена *2* относительно звена *1*; s_{32} – линейное перемещение звена *3* относительно звена *2*

где $\bar{M}_{n,n-1}$ – вектор момента в КП (проекция этого вектора на ось *z* является движущим моментом $M_д$ привода в КП, т.е. $\bar{M}_{z(n,n-1)} = \bar{M}_{д(n,n-1)}$).

Проецируя векторные уравнения на оси координат, получают систему шести алгебраических уравнений откуда определяют шесть неизвестных:

$$F_{x(n,n-1)};\ F_{y(n,n-1)};\ F_{z(n,n-1)};$$
$$M_{x(n,n-1)};\ M_{y(n,n-1)};\ M_{z(n,n-1)} = M_{д(n,n-1)}.$$

Далее рассматривают равновесие звена *n* –1. При этом в месте его присоединения к звену *n* приложены реакции со стороны звена *n*:

$$F_{x(n-1,n)};\ F_{y(n-1,n)};\ F_{z(n-1,n)};\ M_{x(n-1,n)};$$
$$M_{y(n-1,n)};\ M_{z(n-1,n)} = M_{д(n-1,n)}.$$

Они равны по величине и противоположны по направлению реакциям, определенным на предыдущем этапе расчета.

Так последовательно составляют уравнения силового равновесия для всех n звеньев механизма. Из решения полученной системы $6n$ уравнений определяют реакции в кинематических парах, движущие силы и моменты.

Расчет быстродействия промышленного робота

Время выполнения роботом цикла перемещений детали во многом определяет производительность всего роботизированного комплекса. Поэтому требования к быстродействию робота обычно достаточно высокие. Время выполнения роботом технологической операции обусловлено законами изменения внешних сил (движущих и сопротивления) и инертностью звеньев механизма.

Закон изменения управляющих сил зависит от типа используемого привода и от вида системы управления. Существуют роботы с гидравлическими, пневматическими, электрическими и комбинированными приводами. В них применяют цикловые, позиционные или контурные системы управления.

Рассмотрим расчет быстродействия одного из приводов промышленного робота с цикловой системой управления. При цикловой системе управления относительные перемещения звеньев ограничены передвижными упорами и концевыми выключателями.

На рис. 13 изображена структурная схема трехподвижного манипулятора промышленного робота (*1, 2, 3* – подвижные звенья, *0* – неподвижное звено). Здесь же приведена циклограмма настройки командоаппарата (сплошные линии) и циклограмма работы промышленного робота (пунктирные линии).

Общее время рабочего цикла $T_ц$ состоит из времени выстоя в заданных положениях (на циклограмме выстой показан горизонтальными прямыми) и времени относительных перемещений звеньев из одного заданного положения в другое $t_п$ и обратно $t_о$ (наклонные прямые на диаграммах). Время выстоя обычно задано условиями технологического процесса. Время выполнения роботом движений определяют динамические характеристики приводов и манипулятора – движущие силы

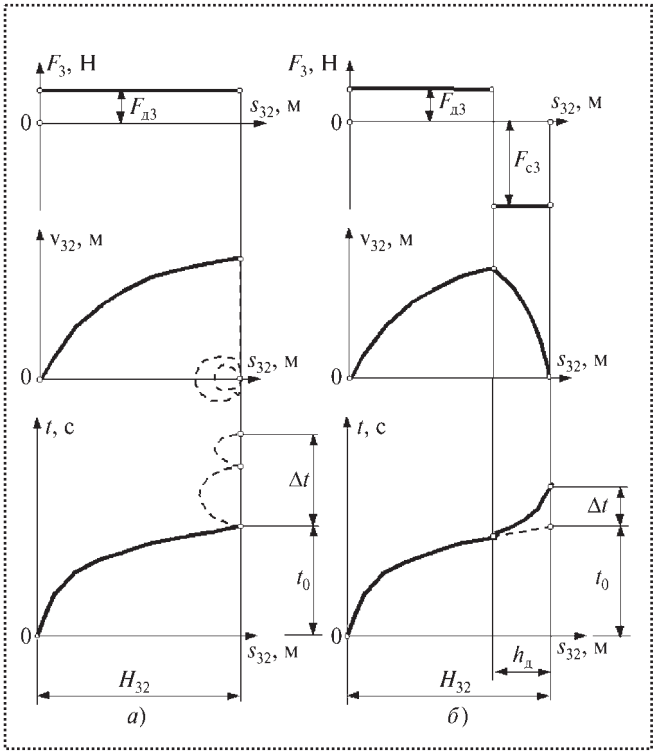


Рис. 14. Влияние демпфера и переходных процессов на время цикла:
а – упор без демпфера; *б* – упор с демпфером; t – текущее время; F_3 – суммарная сила на звено *3*; $F_{с3}$ – сила сопротивления; Δt – увеличение времени цикла; a_{32} – ускорение звена *3* относительно звена *2*

и силы сопротивления, массы и моменты инерции звеньев.

Рассмотрим работу пневмопривода перемещения руки манипулятора (см. рис. 13). По сигналу от командоаппарата в правую полость цилиндра подают сжатый воздух, который действует на поршень с силой

$$F_{д3} = pf_п ,$$

где p – давление воздуха;

$f_п$ – активная площадь поршня. Под действием этой силы поршень и рука *3* перемещаются влево с постоянным ускорением и с возрастающей скоростью v_{32} (рис. 14, *а*). Ограничение хода поршня может осуществляться либо жестким упором без демпфера, либо упором с демпфером.

При остановке на упоре без демпфера, скорость звена *3* должна мгновенно уменьшиться с некоторого конечного значения до нуля, а ускорение a_{32} стремится к бесконечности. Такую остановку звена называют жестким ударом. Она сопровождается

большими динамическими нагрузками на звенья механизма.

Так как реальный манипулятор представляет собой упругоинерционную систему, то эти нагрузки вызовут отскок звена *3* от упора и колебания всего механизма: схват будет совершать колебания относительно заданного конечного положения. Время затухания этого процесса значительно снижает быстродействие промышленного робота, увеличивая время цикла на Δt (рис. 14, *б*).

Уменьшить эти колебания или вообще исключить их можно, обеспечив безударный останов:

$$v_{32n} = 0;\ a_{32n} = 0,$$

где v_{32n}, a_{32n} – относительная скорость и относительное ускорение звеньев в момент останова. Однако это осуществимо только в регулируемом приводе при контурном управлении. Кроме того, при безударном останове в конце хода относительная скорость близка к нулю, поэтому время перемещения схвата в требуемое положение значительно возрастает.

Компромиссным решением является останов с мягким ударом, при котором относительная скорость в конце хода $v_{32n} = 0$, а ускорение ограничено некоторым допустимым значением $a_{32n} \le [a]$. В механизмах с цикловым управлением режим движения с мягким ударом обеспечивают установкой упоров с демпферами, гасящими кинетическую энергию руки.

Расчет демпфера проводят из условия, что суммарная работа в конце цикла $A_{\Sigma n} = 0$. Это условие обеспечивают равенством за цикл движения работы $A_{Fд3}$ движущей силы и работы $F_{Fс}$ силы сопротивления демпфера (рис. 14, *б*):

$$A_{Fд3} = -A_{Fс} \text{ или } F_{д3}(H_{32} - h_д) = -F_с h_д .$$

В этом выражении неизвестны две величины $F_с$ и $h_д$. Одну из них задают, вторую рассчитывают. При мягком ударе приращение времени цикла Δt значительно меньше, чем при безударном останове.

Уравновешивание манипуляторов

В большинстве кинематических схем манипуляторов приводы воспринимают статические нагрузки от сил тяжести звеньев, что значительно увеличивает необходимую мощность двигателей и моменты тормозных устройств. Известны три способа борьбы с этим дополнительными нагрузками.

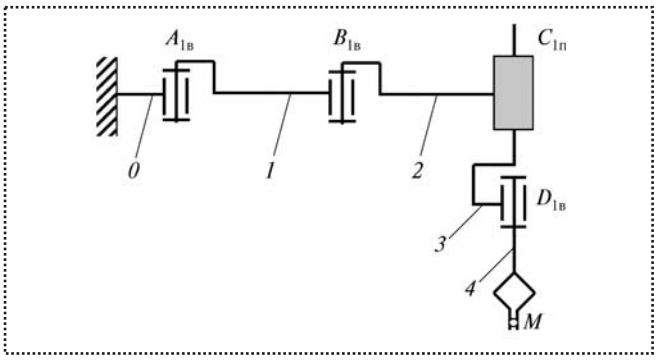


Рис. 15. Структурная схема манипулятора, в котором силы тяжести звеньев воспринимают подшипники:
0 – неподвижное звено; *1, 2, 3, 4* – подвижные звенья; 1в – одноподвижная вращательная КП; 1п – одноподвижная поступательная КП

1. **Используют кинематические схемы** манипуляторов, в которых силы тяжести звеньев воспринимают подшипники кинематических пар. При этом силы тяжести оказывают влияние на мощность приводов и тормозных устройств только через силы трения в подшипниках. В качестве примера на рис. 15 показана структурная схема робота SCARA (аналогична схеме Skilam). Недостатком этого метода являются большие осевые нагрузки в подшипниках.

2. **Используют уравновешивание звеньев** манипулятора с помощью корректировки их массы. На звеньях манипулятора (последовательно, начиная со схвата) размещают корректирующие массы m_{ki}, которые смещают центр массы звена i из точки s_i в точку s_{ki} – в центр КП (рис. 16). Недостатком этого метода является значительное увеличение масс и моментов инерции звеньев манипулятора.

3. **Используют уравновешивание сил тяжести** звеньев манипулятора упругими разгружающими устройствами (приспособлениями) при помощи пружин или сжатого воздуха. Эти устройства не позволяют обеспечить полную разгрузку приводов от действия сил тяжести на всем относительном перемещении звеньев. Поэтому конструкция этих устройств включает кулачковые или рычажные механизмы, согласующие линейную характеристику пружины с характеристикой уравновешиваемых сил.

На рис. 17 показана схема промышленного робота, в котором привод вертикального перемещения руки снабжен механизмом для силового уравновешивания массы звеньев *2* и *3*. Устройство со-

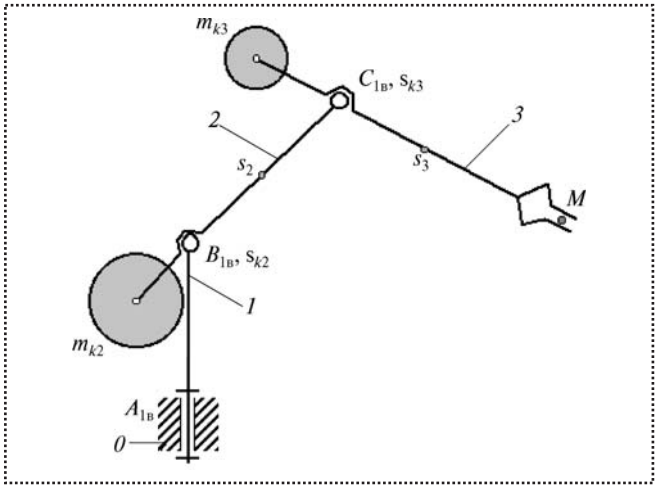


Рис. 16. Статическое уравновешивание звеньев манипулятора

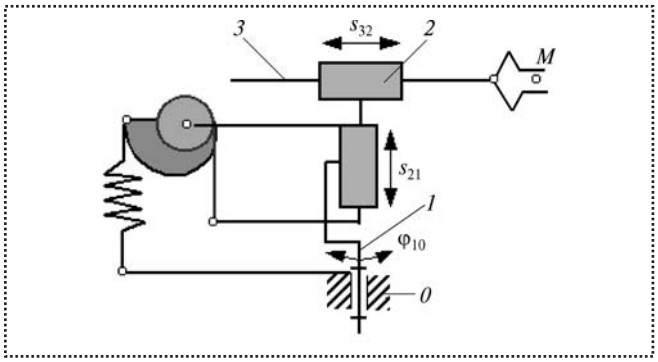


Рис. 17. Разгрузка привода манипулятора от сил тяжести звеньев

стоит из пружины и кулачкового механизма; профиль кулачка выполнен по спирали Архимеда.

Точность манипуляторов промышленного робота

Точность манипуляторов определяют погрешностями позиционирования характеристической точки схвата (точка *M*) и погрешностями угловой ориентации схвата. Погрешности позиционирования обусловлены отклонениями размеров звеньев, зазорами в КП, деформациями звеньев (упругими и температурными), а также погрешностями системы управления и датчиков обратной связи.

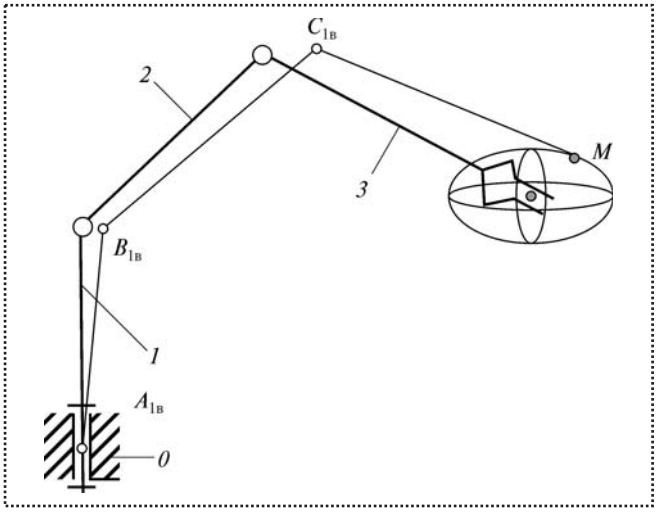


Рис. 18. Ошибка позиционирования схвата манипулятора – "эллипсоид отклонений"

В паспортных данных манипуляторов указывают максимально допустимое отклонение центра схвата манипулятора точки *M* от ее номинального расположения на множестве возможных конфигураций механизма.

В результате погрешностей реальное положение точки *M* отклоняется от расчетного. Для оценки величины отклонения используют вектор, начало которого расположено в расчетной точке, конец – в ее реальном положении. Конец этого вектора относительно расчетного положения точки *M* описывает в пространстве некоторый эллипсоид, который называют эллипсоидом отклонений (рис. 18).

Список литературы

1. **Козырев Ю.Г.** Промышленные роботы. Справочник. М.: Машиностроение, 1988. 392 с.

2. **Механика** промышленных роботов: Учеб. пособ. для втузов: В 3-х кн. / под ред. К.В. Фролова, Е.И. Воробьева. М.: Высш. шк., 1988.

3. **Пол Р.** Моделирование, планирование траекторий и управление движением робота-манипулятора. М.: Наука, 1976.

4. **Силовой** расчет, уравновешивание, проектирование механизмов и механика манипуляторов: Учеб. пособ. для студентов смешанной формы обучения / И.Н. Чернышева, А.К. Мусатов, Н.А. Глухов и др.; под ред. А.К. Мусатова. М.: Изд-во МГТУ, 1990. 80 с.

УДК 621.22.018.8

В.К. Кутузов, *д-р. техн. наук,* **С.А. Воронов**, *канд. техн. наук,*
Ю.В. Сергеев *(ГОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", г. Ковров)*

Исследование влияния режимов нагружения аксиально-поршневых гидромашин на продолжительность их испытаний

Представлена разработанная и апробированная авторами методика расчета коэффициента ускорения испытаний аксиально-поршневых гидромашин. Даны аналитические выражения связи длительности ускоренных ресурсных испытаний и параметров режимов нагружения. На основе методики расчета коэффициента ускорения испытаний сформированы режимы нагружения ускоренных испытаний аксиально-поршневых гидромашин.

In article the technique of account of factor of acceleration of tests of axial-piston hydromachines is submitted developed by the authors and approved, the analytical expressions of connection of duration of the accelerated resource tests and parameters of modes loading are given, on the basis of a technique of account of factor of acceleration of tests the modes loading of the accelerated tests of axial-piston hydromachines are generated.

При создании новых и совершенствовании существующих высокотехнологичных машин и механизмов предъявляют повышенные требования к надежности и долговечности работы всех комплектующих их систем и элементов. Это в большей степени относится и к гидроприводам на базе аксиально-поршневых гидромашин.

Одним из основных источников получения объективной информации о реальных характеристиках гидроприводов и их элементах, их функционировании и причинах отказов являются испытания. При этом сокращение сроков испытаний с сохранением достоверности их результатов является актуальной задачей гидроприводостроения.

В процессе работы аксиально-поршневых гидромашин в их парах трения ("блок цилиндров – торцовый распределитель", "блок цилиндров – поршни", "упорный диск – подпятники" и др.) происходит накопление повреждений из-за изнашивания, мало- и многоцикловой усталости, кавитационных разрушений и т.д., что в конечном итоге определяет надежность и долговечность гидромашины в целом. Периодические испытания на гарантийную наработку, практикуемые в настоящее время для оценки качества, например изготовления и сборки гидромашин, имеют большую продолжительность и являются весьма дорогостоящими. Поэтому в практике проведения данных испытаний существует тенденция к сокращению времени их проведения.

Эффективность ускоренных ресурсных испытаний аксиально-поршневых гидромашин характеризуют коэффициентом ускорения $K_у$, равным отношению времени $\tau_{норм}$ наработки при нормальных эксплуатационных режимах к длительности $\tau_у$ работы при ускоренных испытаниях, защищающих тот же ресурс [1]:

$$K_у = \frac{\tau_{норм}}{\tau_у}. \quad (1)$$

При разработке методики определения коэффициента ускорения испытаний гидромашин был принят ряд допущений:

♦ гидромашины – это невосстанавливаемые объекты;

♦ время гарантийной наработки определяют безотказной работой всех узлов гидромашин;

♦ понятие долговечности совпадает с понятием безотказности [2];

♦ износ происходит в результате непосредственного контакта поверхностей.

Учитывая, что ресурс основных пар трения гидромашины (подшипников скольжения) пропорционален величине допустимого износа $[h]$ и обратно пропорционален интенсивности J_h изнашивания и скорости v_s скольжения в контакте [3, 4], т.е. $\tau = \frac{[h]}{J_h v_s}$, выражение (1) можно представить в виде

$$K_у = \frac{J_h^{ф} v_s^{ф}}{J_h^{норм} v_s^{норм}}, \quad (2)$$

где $J_h^{ф}$, $J_h^{норм}$ – интенсивности изнашивания материалов при форсированных и нормальных (штатных) режимах соответственно;

$v_s^{ф}$, $v_s^{норм}$ – скорости скольжения в контакте при форсированных и нормальных (штатных) режимах соответственно.

В выражении (2) величину скорости v_s скольжения можно заменить угловой скоростью ω или частотой n вращения блока цилиндров, поскольку $v_s = \omega r$, а $\omega = \pi n/30$.

Для упругого контакта трущихся деталей машин, вызывающего многоцикловое усталостное разрушение (изнашивание) контактирующих поверхностей согласно исследованиям И.В. Крагельского [4], интенсивность J_h изнашивания зависит от нормального давления q в контакте в степени больше единицы:

$$J_h = Cq^{\left[1+\frac{t_у}{2\nu+1}\right]}, \qquad (3)$$

где C – коэффициент пропорциональности;

q – удельное нормальное контактное давление, прямопропорциональное давлению нагнетания $p_н$;

$t_у$ – параметр кривой фрикционной усталости (кривой Веллера) материала;

ν – параметр, характеризующий начальный участок опорной кривой профиля поверхности $t_р = b\varepsilon^{\nu}$.

Выражение (3) показывает, что увеличение нагрузки (форсирование по давлению) ведет к росту интенсивности изнашивания. Однако при ускоренных испытаниях необходимо обеспечивать подобие процессов возникновения отказов в нормальном и форсированном режимах, т.е. соблюдать условие непревышения допустимых напряжений на смятие, условие сохранения упругого контакта между сопряженными поверхностями.

Подставляя выражение (3) в уравнение (2), заменив в нем нормальное давление q на давление $p_н$ нагнетания, а скорость скольжения v_s на частоту n вращения блока цилиндров и проведя соответствующие преобразования, получим следующее выражение для коэффициента ускорения испытаний:

$$K_у = \left(\frac{p_н^{ф}}{p_н^{норм}}\right)^{\left[1+\frac{t_у}{2\nu+1}\right]} \frac{n^{ф}}{n^{норм}}, \qquad (4)$$

где $p_н^{норм}$ и $n^{норм}$ – соответственно номинальные значения давления нагнетания и частоты вращения блока цилиндров при испытаниях в нормальном режиме;

$p_н^{ф}$ и $n^{ф}$ – давление нагнетания и частота вращения блока цилиндров при форсированных испытаниях.

Согласно теории трения и изнашивания [4] для случая упругого контакта все физико-механические характеристики материалов в расчетных формулах относятся к изнашиваемой, т.е. более мягкой, пластичной поверхности, а геометрические характеристики к изнашивающей, более твердой поверхности. Поэтому при расчетах пар трения "блок цилиндров – распределитель", "поршень – цилиндр" и "подпятник – упорный диск" аксиально-поршневой гидромашины, согласно [4], можно принять параметр кривой фрикционной усталости $t_у$ = 5...6, параметр начального участка кривой опорной поверхности ν = 1,5. Тогда выражение для определения коэффициента ускорения испытаний (4) примет вид

$$K_у = \left(\frac{p_н^{ф}}{p_н^{норм}}\right)^{2,19} \frac{n^{ф}}{n^{норм}}. \qquad (5)$$

Были проведены расчет коэффициента ускорения испытаний и ускоренные ресурсные испытания аксиально-поршневой гидромашины II гаммы № 1,5-ПМ. В результате было установлено, что форсирование давления нагнетания по сравнению со штатными режимами в 1,7 раза позволило сократить продолжительность испытаний в 3,2 раза.

В качестве критериев оценки адекватности ускоренных испытаний были приняты суммарная величина износа торцов блока цилиндров и распределителя и величина расхода утечек рабочей жидкости из корпуса гидромашины, которые после испытаний составляли соответственно 16 мкм и 140 см^3/мин. Это соответствует среднестатистическим значениям данных параметров после ресурсных испытаний этих типоразмеров гидромашин на штатных режимах [5].

На основе предложенной методики расчета коэффициента ускорения испытаний была проведена работа по формированию режимов ускоренных ресурсных испытаний существующих аксиально-поршневых гидромашин.

В качестве объектов были выбраны аксиально-поршневые гидромашины с наклонным диском с рабочими объемами 89 и 112 см^3, широко исполь-

зуемые в силовых регулируемых гидроприводах различного назначения.

В качестве исходных данных были рассмотрены штатные режимы испытаний объемных гидроприводов. Общая продолжительность испытаний аксиально-поршневых гидромашин с наклонным диском на штатных режимах составляет 600 ч. Испытания проводили циклами по 2 ч (табл. 1).

В заданных режимах нормальных испытаний (см. табл. 1) имеется несколько ступеней, каждой из которых соответствует свое значение давления нагнетания и частоты вращения приводного вала. Были рассчитаны номинальные значения этих параметров $p_н^{норм}$ и $n^{норм}$, т.е. такие значения факторов нагружения, стационарное воздействие которых в течение времени наработки было бы эквивалентно воздействию ступенчатого нагружения за то же время:

$$p_н^{норм} \approx 9{,}6 \text{ МПа}, \; n^{норм} \approx 2440 \text{ мин}^{-1}.$$

1. Цикл штатных режимов нагружения гидропривода

Давление нагнетания, МПа (кгс/см^2)	Частота вращения вала насоса, мин$^{-1}$	Направление отклонения валика управления	Время, мин
35±1,5 (350±15)	1000±100	По часовой стрелке	0,5
3±1,5 (30±15)			3,0
23±1,5 (230±15)	2900±100		1,0
3±1,5 (30±15)			3,0
37±1,5 (370±15)	2500±100		0,5
8±1,5 (80±15)			52,0
35±1,5 (350±15)	1000±100	Против часовой стрелки	0,5
3±1,5 (30±15)			3,0
23±1,5 (230±15)	2900±100		1,0
3±1,5 (30±15)			3,0
37±1,5 (370±15)	2500±100		0,5
8±1,5 (80±15)			52,0
		Итого	120,0
Примечание. Угол установки валика управления 20^{+2} град.			

Методы ускоренных испытаний по жесткости применяемых режимов подразделяют на две категории: испытания на нормальных режимах (методы прогнозирования) и испытания в форсированных режимах.

К методам ускоренных испытаний в нормальных режимах относят, в частности, методы, использующие воспроизведение спектра эксплуатационных нагрузок, максимально влияющих на работоспособность изделий и исключение режимов холостых ходов.

Для сокращения сроков испытаний гидроприводов было предложено изменить режимы испытаний, исключив работу гидропривода на режимах с минимальной нагрузкой и форсировав давление на самом продолжительном участке цикла с 8 до 12 МПа. В результате были получены следующие режимы нагружения (табл. 2).

По приведенным параметрам нагружения (см. табл. 2) были рассчитаны средние значения давления $p_н^ф$ нагнетания и частоты $n^ф$ вращения приводного вала насоса в цикле форсированных режимов нагружения, эквивалентное воздействию ступенчатого нагружения за время цикла:

$$p_н^ф \approx 16{,}06 \text{ МПа}, \; n^ф \approx 2477 \text{ мин}^{-1}.$$

По формуле (5) определяли коэффициент ускорения испытаний, он составил $K_у \approx 3{,}1$.

2. Цикл форсированных режимов нагружения гидропривода

Давление нагнетания, МПа (кгс/см^2)	Частота вращения вала насоса, мин$^{-1}$	Направление отклонения валика управления
35±1,5 (350±15)	1000±100	По часовой стрелке
23±1,5 (230±15)	2900±100	
37±1,5 (370±15)	2500±100	
12±1,5 (120±15)		
35±1,5 (350±15)	1000±100	Против часовой стрелки
23±1,5 (230±15)	2900±100	
37±1,5 (370±15)	2500±100	
12±1,5 (120±15)		
Примечание. Угол установки валика 20^{+2} град.		

По формуле (1) была определена общая длительность работы при ускоренных испытаниях:

$$\tau_у = \frac{\tau_{норм}}{K_у} = \frac{600}{3,1} \approx 194 \text{ ч.}$$

Время работы на отдельных режимах нагружения было установлено пропорционально продолжительности работы при штатных режимах нагружения.

Выводы

♦ Представлена методика расчета коэффициента ускорения испытаний аксиально-поршневых гидромашин, учитывающая параметры физико-механических характеристик материалов и микрогеометрию контактирующих поверхностей выделенных критичных элементов (пар трения) гидромашин, отличающаяся удобством для практического применения.

♦ Приведены аналитические выражения связи длительности ускоренных ресурсных испытаний и их режимов на основе равных средних величин накопления износных и усталостных повреждений в выделенных критичных элементах при эксплуатационных и ускоренных испытаниях и на основе сохранения вида и характера процесса накопления повреждений.

♦ На основе методики расчета коэффициента ускорения испытаний сформированы режимы нагружения, позволившие снизить продолжительность испытаний аксиально-поршневых гидромашин с наклонным диском с рабочими объемами 89 и 112 см^3 примерно в 3 раза.

Список литературы

1. **Надежность** и эффективность в технике: справочник в 10 т. / Ред. совет: В.С. Авдуевский (председатель) и др. Т. 4.: Методы подобия в надежности / под общ. ред. В.А. Мельникова, Н.А. Северцева. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.

2. **Сырицин Т.А.** Эксплуатация и надежность гидро- и пневмоприводов: учебник для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1990. 248 с.

3. **Дроздов Ю.Н., Павлов В.Г., Пучков В.Н.** Трение и износ в экстремальных условиях: справочник. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

4. **Справочник** по триботехнике / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1.: Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. 400 с.

5. **Сергеев Ю.В.** Анализ методов ускорения испытаний гидропередач и разработка методики определения коэффициента ускорения испытаний // Гидропневмоавтоматика и гидропривод – 2005. Сборник научных трудов. Ковров: КГТА, 2006. С. 206–211.

Журнал
"Сборка в машиностроении, приборостроении"

распространяется только по подписке

Подписные индексы:

79748 – по каталогу агентства "Роспечать",
84967 – по Объединенному каталогу "Пресса России",
60257 – по каталогу "Почта России"

или непосредственно в издательстве.

Телефоны: (495) 269-66-00, 268-85-26, 268-38-42.
Факс: (495) 269-48-97, 268-85-26.
E-mail: sborka@mashin.ru.

Ю.Б. Кузин, А.И. Куменко, *д-р техн. наук (ОАО "ОГК–5"),*
А.З. Зиле *(ОАО "ВТИ")*

Запуск в эксплуатацию системы удаленного доступа ОАО "ОГК–5" к системе АСКВМД ОАО "ВТИ" на базе аппаратуры НТЦ "Виконт" и ЗАО "Энергоприбор"

Рассмотрен пилотный проект автоматизированной системы виброконтроля, вибромониторинга и вибродиагностики (АСВКМД) с реализацией удаленного доступа и обсуждение проблемы его создания.

Создание систем удаленного доступа к базам данных текущей измеренной или обработанной информации в режиме "ON-LINE" позволяет более эффективно управлять производством во всех звеньях технического обслуживания и бизнеса. Наиболее сложные проблемы создания таких систем связаны с главными технологическими задачами [1].

В настоящее время в ОАО "ОГК–5" имеется 40 агрегатов мощностью 30...500 МВт, из которых около 30 % оснащены системами АСВКМД с установкой датчиков вала. В разработках и поставках на разных электростанциях приняли участие:

♦ ООО "Виконт" – оснащение аппаратурой виброконтроля и датчиками абсолютной вибрации опор восьми блоков мощностью 300 МВт производства ЛМЗ, установленных в филиале ОАО "ОГК–5" Конаковская ГРЭС;

♦ ЗАО "Энергоприбор" – поставка и монтаж аппаратуры механических величин и датчиков вибрации вала на трех модернизированных турбинах 300 МВт с реактивным ЦВД;

♦ ОАО "ВТИ" – разработка системы вибромониторинга и вибродиагностики.

В ОАО "ОГК–5" установлена и работает одна из первых систем "Удаленного доступа" к базе данных АСВКМД.

Подход и структура АСКВМД описаны в [2, 3]. На сегодня диагностический модуль этой системы находится в стадии промышленного освоения и отладки.

Главное рабочее окно системы АСВКМД (рис. 1) тремя цветами (зеленый, желтый и красный) интегрально отражает вибрационное состояние всех восьми блоков станции. При превышении установленного значения любого параметра выдается соответствующее сообщение.

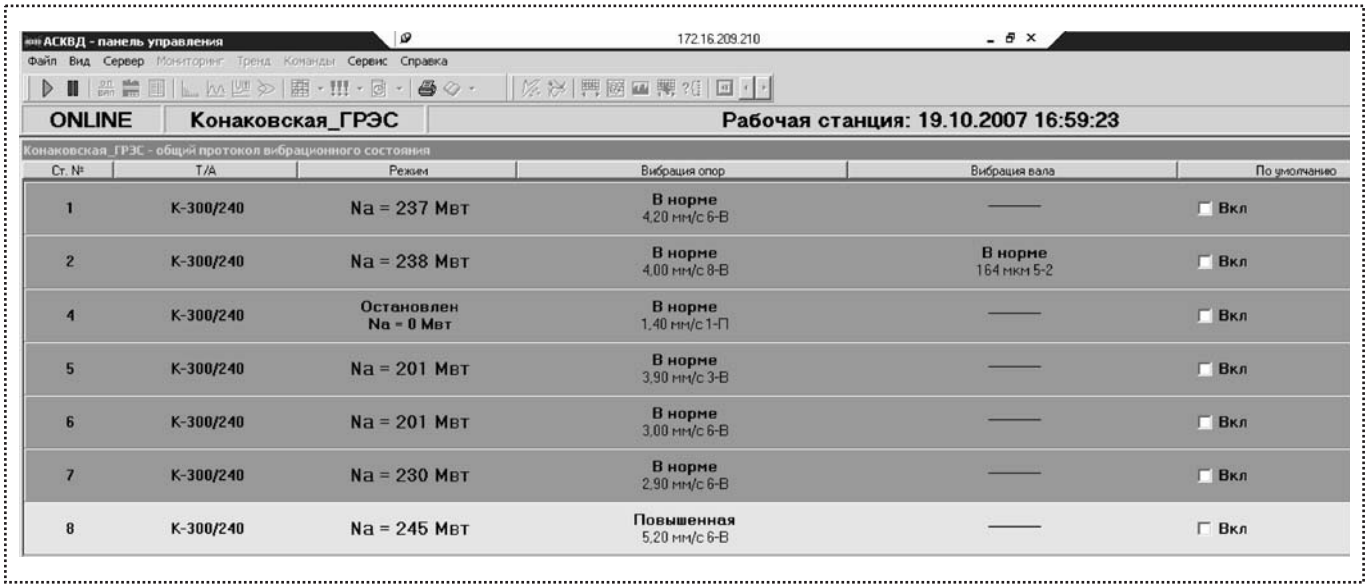


Рис. 1. Главная информационная страница системы АСВКМД

При этом в режиме "ON-LINE" доступны следующие характеристики блоков станции:

♦ тренды любого измеренного параметра за любой период работы;

♦ спектральные характеристики вибраций опор и вала;

♦ положение цапф вала в области возможных перемещений;

♦ траектории движения оси вала в области возможных перемещений;

♦ область перемещений цапф, построенная по текущим зазорам в подшипниках;

♦ осциллограммы процессов во времени;

♦ АФЧХ при развороте турбины и на выбеге;

♦ величины осевого сдвига, относительного и абсолютного расширения, искривления вала, уклонов и пр.

Результаты могут быть представлены в виде диаграмм (гистограмм), таблиц и пр. Спектры и осциллограммы можно посмотреть для каждой опоры в любом направлении, а также их разброс по времени. Параметры могут быть представлены в разных единицах измерения.

На рис. 2 показана главная диаграмма по текущему состоянию блока № 8. На одном из подшипников вибрация превышает допустимое значение 4,5 мм/с. Вибрационное состояние по другим опорам в норме.

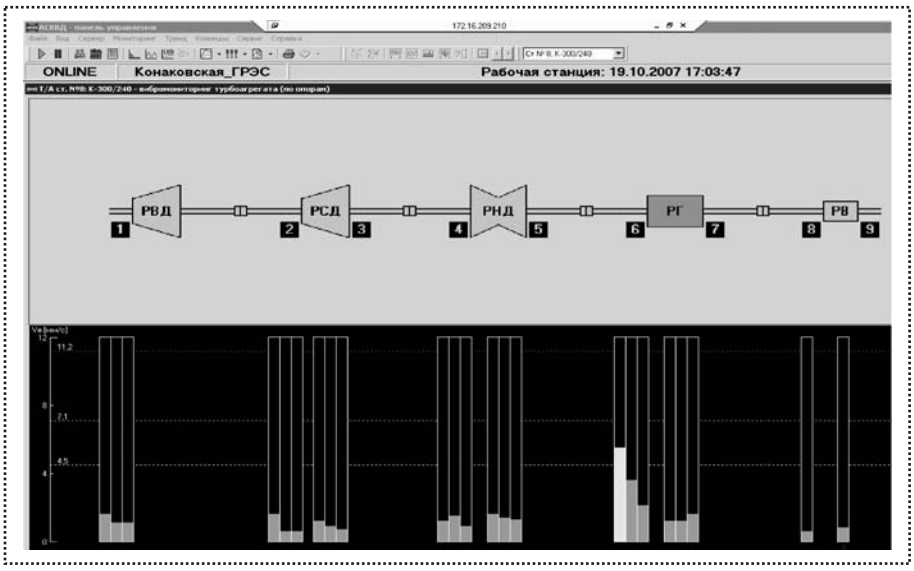


Рис. 2. Главная диаграмма по текущему состоянию вибрации опор станции № 8

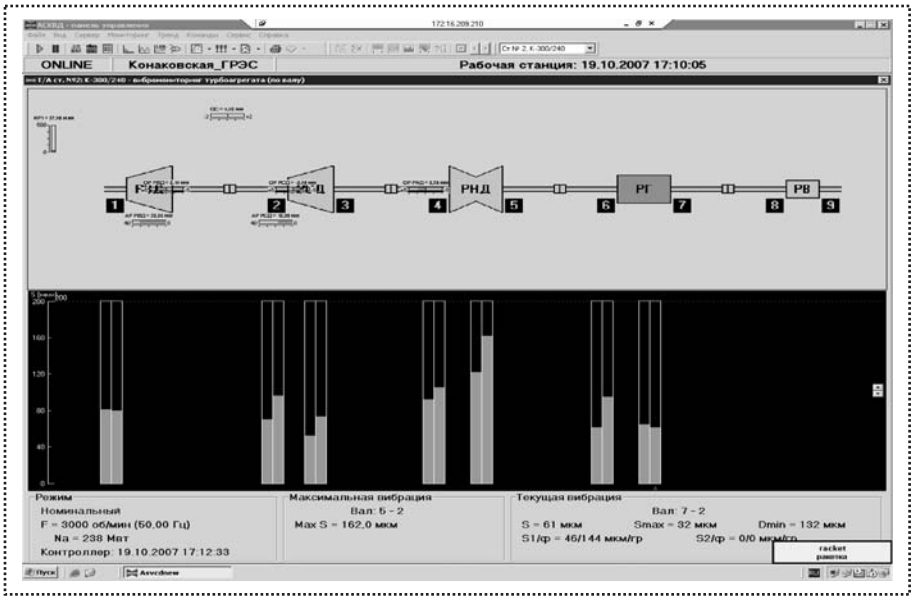


Рис. 3. Главная диаграмма по текущему состоянию относительной вибрации вала мощностью 300 МВт станции № 8

Превышения норм по величине вибраций для большинства турбин носят незначительный характер. Анализ трендов показывает, что центрирование валопровода нарушается из-за сезонных расцентровок опор и, прежде всего, между турбиной и генератором.

Система АСВКМД также дает возможность оценить вибрации турбоагрегата по валу (рис. 3).

На рис. 4 отражены данные по перемещению оси вала и зазорам в подшипниках.

Положение осей цапф в области кривой подвижного равновесия показывает, что при прочих равных условиях перегружены отдельные опоры. Анализ величин перемещения осей вала и цапф дает возможность оптимизировать центровки роторов по полумуфтам. Амплитуды и фазы оборотной вибрации вала предполагается использовать для получения чувствительности по валу и его балансировки.

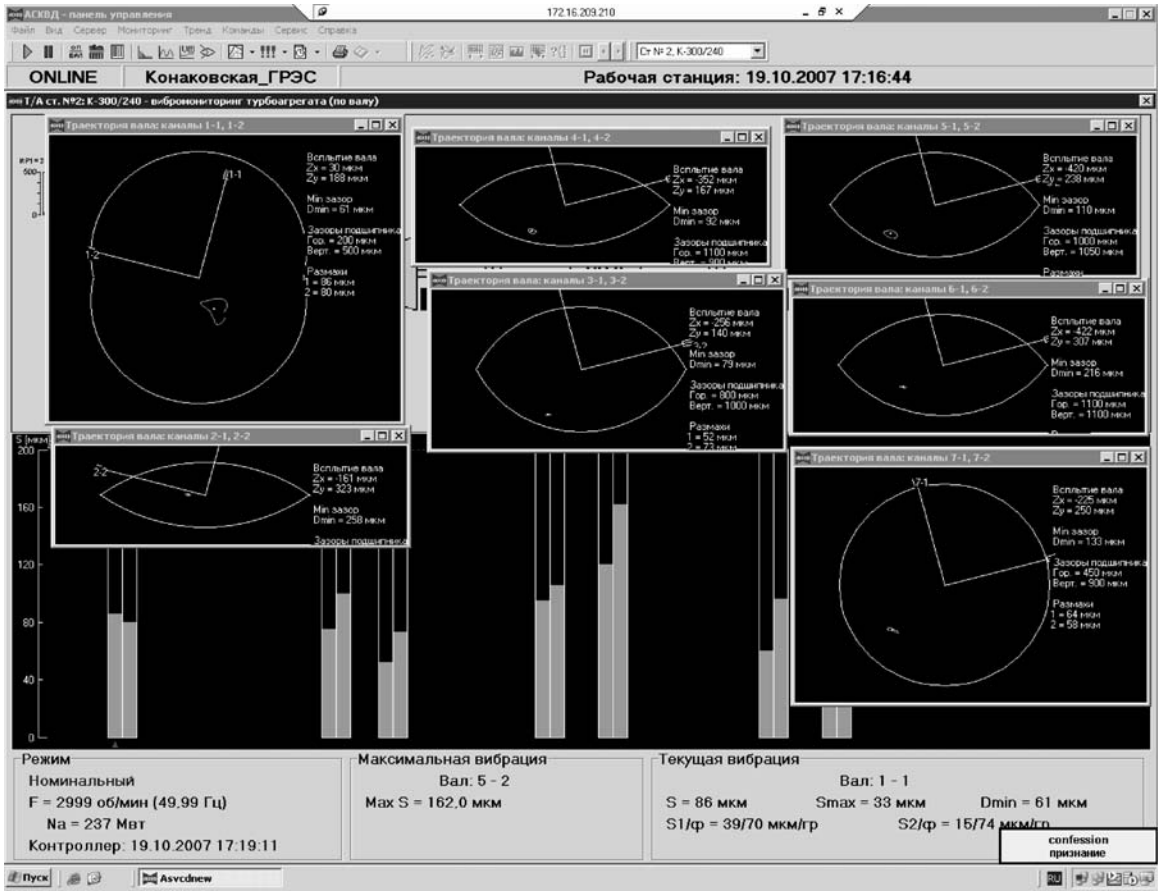


Рис. 4. Данные рабочей станции по валу

Также в настоящее время подключена система удаленного доступа к турбинам Рефтинской ГРЭС.

Выводы

Представленная система АСВКМД позволяет:

♦ проводить наблюдение за работой агрегата после его сборки, оценивать качество сборки роторов с валопроводом по величине перемещения оси вала в подшипниках скольжения;

♦ проводить наработки по корректировке центровок роторов по полумуфтам, отслеживать просадки и повреждения (износ) опор при эксплуатации в будущем;

♦ выйти на новый качественный уровень балансировок вала с использованием амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик, измеренных непосредственно на валу.

Список литературы

1. **Куменко А.И.** Концепция современной системы вибромониторинга и вибродиагностики мощного турбоагрегата. Сб. докл. международного технического совещания "Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций". М.: ВТИ. 26 октября 2007. С. 4–16.

2. **Зиле А.З., Комаров В.В., Руденко М.Н., Томашевский С.Б.** Вибродиагностический контроль турбоагрегатов в энергетике. "Теплоэнергетика", № 4, 2003.

3. **Куменко А.И.** Влияние эксплуатационных факторов на статические и динамические характеристики валопроводов мощных паровых турбин // Вестник МЭИ. № 3. 1994. С. 63–69.

УДК 621.757

В.Г. Шуваев, *канд. техн. наук,* **И.В. Шуваев**, *канд. техн. наук*
(Самарский государственный технический университет)

Повышение эффективности разборки резьбовых соединений с применением ультразвуковых колебаний

Рассмотрены вопросы применения ультразвука для повышения эффективности развинчивания резьбовых соединений, охваченных коррозией, в условиях схватывания, при наличии наполнителей. Решение задачи основано на создании многомерного вибрационного поля, возбуждаемого в резьбовом соединении.

Questions of application of ultrasound for raise of efficiency of screwing off of the threaded connections captured by corrosion, in conditions of adhesion at presence of fillers are observed in this paper. The solution of this problem is based on creation of the multivariate vibrating field energized in a threaded connection.

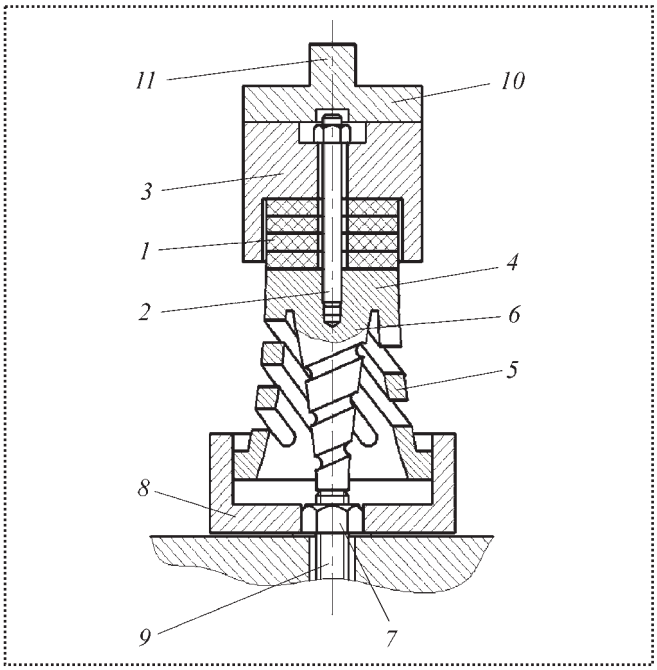
Одним из перспективных направлений повышения эффективности сборочно-разборочных работ является использование ультразвуковых колебаний (УЗК), введение которых в рабочую зону приводит к существенному изменению физико-химических процессов контактного взаимодействия деталей [1].

Практический интерес представляет использование УЗК в процессах развинчивания резьбовых соединений, охваченных коррозией, в условиях схватывания, при наличии различных наполнителей (краски, герметика, грунтовки и других).

Проведенными исследованиями установлено, что амплитуды и направление УЗК оказывают определяющее влияние на такие характеристики резьбового соединения, как сила и момент развинчивания [2], причем осевые и крутильные колебания одинаковой амплитуды оказывают различное влияние на эффективность разборки соединений. Эффективность применения УЗК при разборке резьбовых соединений оценивают по снижению момента развинчивания, зависящего от амплитуды и направления введения колебаний.

Известные методы и средства ультразвуковой разборки резьбовых соединений недостаточно полно используют широкие возможности УЗК по созданию многомерных вибрационных полей в резьбе, позволяющих направлению воздействовать на факторы, препятствующие разборке резьбовых соединений. Одним из решений задачи повышения эффективности разборки резьбовых соединений является приложение к болту и гайке противоположно направленных крутильных колебаний с одновременным воздействием на соединение продольными колебаниями [3].

Для реализации предлагаемого метода разработано устройство для разборки резьбовых соединений (рис. 1), содержащее преобразователь *1*, служащий для генерации упругих механических колебаний. Этот преобразователь набран из пьезокерамических шайб осевой поляризации и зажат при помощи шпильки *2* между корпусом *3* устройства и частотопонижающим элементом *4*, с которым за одно целое



Ультразвуковое устройство для разборки резьбовых соединений

выполнены торсион *5* и концентратор *6*, причем торсион и концентратор снабжены наклонными пазами, имеющими противоположную ориентацию.

Для передачи крутильных колебаний от торсиона на гайку *7* устройство снабжено наконечником *8*. Торец концентратора взаимодействует с болтом *9*. На корпусе жестко закреплен переходник *10* с квадратом *11*, служащим для фиксации рычага (на рисунке не показан). Наконечник устанавливают на гайку, а во внутреннюю часть наконечника устанавливают нижнюю часть торсиона, при этом торец концентратора прижимают к торцу болта.

При подаче на обкладки пьезокерамического преобразователя электрических колебаний резонансной частоты он изменяет свои геометрические размеры вследствие обратного пьезоэффекта и возбуждает упругие механические колебания, которые передаются в частотопонижающий элемент и механически с ним связанные торсион и концентратор. Причем наличие на их боковых поверхностях наклонных пазов приводит к возбуждению наряду с продольными колебаниями еще и крутильных.

Так как пазы торсиона и концентратора имеют противоположный наклон, то крутильные колебания рабочего торца концентратора и нижней части торсиона также имеют противоположную направленность.

В результате в резьбовом соединении возникает трехмерное вибрационное поле, состоящее из продольных колебаний, передаваемых концентратором через болт, крутильных колебаний, передаваемых торсионом через наконечник на гайку, и крутильных колебаний противоположной направленности, передаваемых концентратором за счет фрикционного контакта на болт. Расчетом резонансной длины концентратора и торсиона добиваются, чтобы на зону резьбового контакта болта и гайки приходилась пучность механических колебаний.

Вывод

Повышение эффективности разборки резьбовых соединений, подверженных коррозии, в условиях схватывания, при наличии наполнителей достигается тем, что гайке сообщают однонаправленные крутильные колебания, на болт воздействуют продольными механическими колебаниями и дополнительными крутильными колебаниями.

Список литературы

1. **Штриков Б.Л., Калашников В.В.** Ультразвуковая сборка. М.: Машиностроение–1, 2006. 225 с.

2. **Штриков Б.Л., Тепляков А.Ю.** Применение ультразвуковых колебаний при сборке и разборке резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2002. № 7. С. 2–4.

3. **Патент РФ** № 2114728; Б.И. № 19; 10.07.98. Способ разборки резьбовых соединений / В.М. Колокольцев, В.Г. Шуваев.

Продолжается подписка
на научно-технический и производственный журнал
"Трение и смазка в машинах и механизмах"

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.

Подписные индексы по каталогам:

20139 – "Роспечать";
39039 – "Пресса России";
60253 – "Почта России".

Подписку можно оформить непосредственно в издательстве.
Телефон редакции: (495) 268-38-42.

УДК 330.115+519.862.6

В.С. Григорьев, *канд. техн. наук (Пензенский государственный университет)*

Ресурсные цепи и аксиоматика их описания

Описаны модели закономерно возникающих связей между применяемыми и получаемыми ресурсами в процессе человеческой деятельности. Обоснована необходимость введения понятия ресурсной цепи с учетом расширенного толкования понятия ресурса. Приведена групповая аксиоматика для преобразования ресурсных цепей в целях согласования цепей одного структурного уровня с цепями другого уровня, что позволяет эффективно управлять процессами человеческой деятельности.

Models of naturally appearing interconnections between applying and receiving resources in the process of human activity are described. The necessity of introduction of such notion as resort chains is justified. It takes into consideration extended interventional extended interpretation of such notion as resource. A group axiomatic for transformation of resort chains in order to coordinate the chains of one structural level with the chains of another level is presented. It allows managing the processes of human activity efficiently.

Всякая деятельность человека или общества, осуществляемая согласно поставленной цели, связана с использованием некоторых ресурсов, которые служат в ней как средство и предмет труда при получении конечного результата (т.е. полезного ресурса), а сама цель выступает в качестве двуединого ресурса, т.е. как мысленно предвосхищаемого и организационно-управляющего.

Выступление цели в качестве двуединого ресурса определяется двусоставной природой человека, т.е. духовной и материальной, и на практике это проявляется в действии закона аддитивности процесса труда. Этот закон гласит, что в каждый момент времени доли умственного и физического труда изменяются, но сумма их остается постоянной, равной единице [1]. При этом соотношение долей затрат умственного и физического труда при реализации жизненного цикла знания (т.е. при его овеществлении) существенным образом влияет на количественные и качественные показатели результата труда.

Кроме того, количественные и качественные показатели результата любого труда зависят от количества и видов используемых ресурсов.

Однако существующее толкование термина "ресурс" как "запасы, источники чего-нибудь", по нашему мнению, является весьма узким и требуется расширенное его толкование в рамках системной методологии. Так, в работе указывается, что "ресурс – это субстанция (нечто, что-либо), используемая или получаемая в деятельности субъекта, которая по качественным и/или количественным признакам может соединяться (увеличиваться, прибавляться и т.п.) или разъединяться (уменьшаться, расходоваться и т.п.)".

Если учесть, что весь окружающий мир состоит из иерархически связанных между собой самоорганизующихся объектов (в порядке: от младшего уровня к старшему) – вакуумных, физических, биологических и экономических, то соответственно их отличительные параметры уровней для объектов: вакуумных – количество; физических – пространство и время; биологических – полезность (потребительская стоимость) и экономических – стоимость, могут определять все возможное разнообразие применяемых и получаемых ресурсов. При этом вышестоящие по иерархии самоорганизующиеся объекты включают в себя отличительные параметры всех нижележащих уровней [2].

Следовательно, самым сложным в описании является экономический самоорганизующийся объект, который может быть охарактеризован пятью видами системных ресурсов: количество, пространство, время, полезность (потребительская стоимость) и стоимость.

Так как любой искусственный процесс отражает собой какую-либо человеческую деятельность, то модель ее элементарного трудового акта можно представить в виде, например, четырехвершинного полного ориентированного графа (рис. 1), в вершинах которого в общем случае последовательно

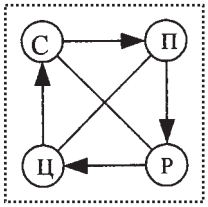


Рис. 1. Модель элементарного трудового акта в виде четырехвершинного полного ориентированного графа

расположены ресурсы – цель (Ц), средство труда (С), предмет труда (П) и результат труда (Р) [3].

Подобная модель элементарного трудового акта применительно, например, к стадии "производство" инновационного процесса с учетом синергизма знания (З) и информации (И) используемых системных ресурсов, представлена на рис. 2 [4].

В этом случае объект имеет информацию (И) о веществе (В) и, обладая знаниями (З) об информации (И) по воздействию энергией (Э) с определенными характеристиками (И) на вещество (В), изменяет его свойства (И), которые дополняют исходную информацию (И) о веществе (В) [4].

Если произвести декомпозицию четырехвершинного полного ориентированного графа с вершинами (см. рис. 2) В–И–Э–В на отдельные ориентированные графы с простыми циклами, то можно выявить из него пять графов с соответствующими вершинами: В–И–Э–В; В–И–Э; Э–В–В; В–В–И; И–Э–В.

Следует заметить, что простым циклом в графе называется цикл, не проходящий ни через одну из вершин графа более одного раза, а сам цикл отражает путь, в котором совпадают его начальная и конечная вершины.

Учитывая, что каждый из указанных здесь ресурсов (И, В, Э), согласно современным научным понятиям, представляет собой совокупность всех этих видов ресурсов (с преобладающей долей одного из них), то с некоторым допущением их отдельно можно охарактеризовать как информацию (И), вещество (В) и энергию (Э).

Следовательно, всякий отдельный ориентированный граф с простым циклом отражает каждым своим ребром значение одного из видов ресурсов (т.е. И, В, Э), задействованных в проведенном элементарном трудовом акте.

Совокупность элементарных трудовых актов, направленных на выполнение частных целей, позволяет выполнить ту или иную операцию (процесс) и в итоге общую цель.

Следует заметить, что в ориентированных графах их ориентированные ребра, отражающие накопление (увеличение) используемых ресурсов, следует указывать со знаком плюс ("+"), а ориентированные ребра, отражающие расходование (уменьшение) используемых ресурсов – со знаком минус ("–").

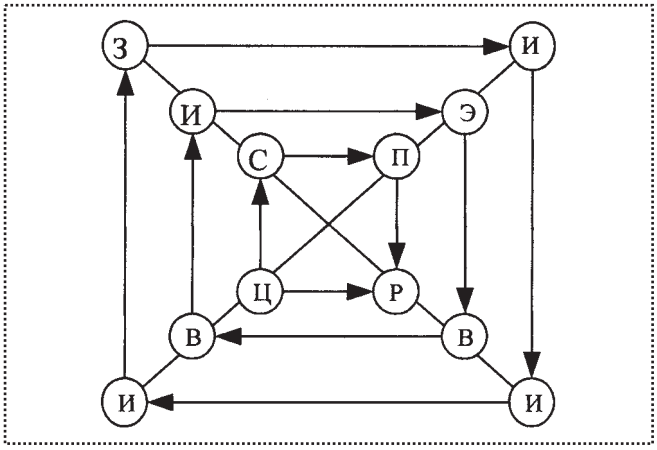


Рис. 2. Обобщенная синергетическая модель элементарного трудового акта на стадии "производство" инновационного процесса

При этом осуществление процедуры накопления и расходования используемых ресурсов на соответствующих ребрах в отдельном ориентированном графе с простым циклом происходит при реализации общей цели.

В свою очередь, сумма накопленного и израсходованного на одном ребре определенного вида ресурса за отдельные трудовые акты в исходном ориентированном графе при реализации общей цели ведет к образованию производного графа с простым циклом.

Таким образом, любой ориентированный граф с простым циклом, ребра которого выражают значения конкретного вида ресурса, практически отражает собой определенную ресурсную цепь.

Необходимо учитывать, что каждое вновь вводимое понятие какого-либо термина должно характеризоваться совокупностью свойственных для него объективных отличительных признаков, отражающих существо его информационного, морфологического и функционального описаний как системы. С учетом выполнения указанных требований можно сказать, что ресурсная цепь – это совокупность (множество) системных ресурсов, образующих между собой связи в виде ориентированного графа с простым циклом и участвующих в каком-либо процессе их увеличения (т.е. накопления, соединения и т.п.) или их уменьшения (т.е. расходования, разъединения и т.п.).

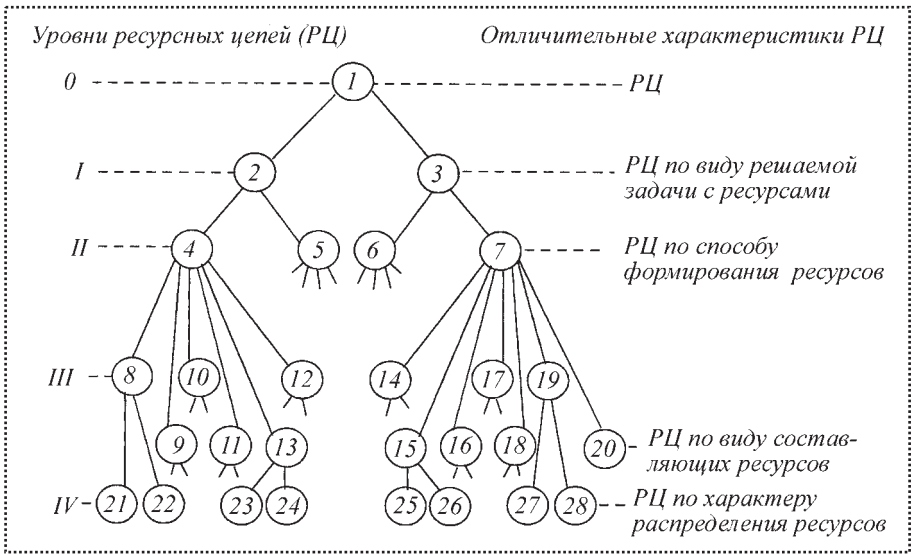


Рис. 3. Иерархическая структура уровней ресурсных цепей:
0...IV – уровни ресурсных цепей (РЦ); *1* – РЦ; *2* – РЦ проектно-плановые; *3* – РЦ балансовые; *4*, *6* – РЦ с естественно формируемыми ресурсами; *5*, *7* – РЦ с искусственно формируемыми ресурсами; *8* – РЦ временные; *9* – РЦ пространственные; *10* – РЦ вещественные; *11* – РЦ информационные; *12* – РЦ энергетические; *13* – РЦ биосферные; *14* – РЦ временные; *15* – РЦ пространственные; *16* – РЦ информационные; *17* – РЦ вещественные; *18* – РЦ энергетические; *19* – РЦ социально-экономические; *20* – РЦ финансовые; *21*, *23*, *25*, *27* – РЦ детерминированные; *22*, *24*, *26*, *28* – РЦ стохастические

В связи с широким кругом объектов, подпадающих под понятие "ресурс", практически не представляется возможным однозначно говорить о классификации ресурсных цепей. Определенно можно лишь утверждать, что их можно применять для описания связей во всем многообразии используемых или получаемых ресурсов, характерных для самоорганизующихся объектов: количество, пространство, время, полезность (потребительская стоимость), стоимость и их возможные производные ресурсы (скорость, искусственные материалы, финансы и др.).

Так, в связи с практикой создания различного рода изделий (т.е. механизмов, машин, приборов и т.п.) возникла необходимость количественного описания связей между геометрическими параметрами (т.е. пространственными ресурсами) составляющих элементов изделий. Это привело к введению понятия размерной цепи, которую следует рассматривать как частный случай по отношению к общему понятию ресурсной цепи, где задействованы только пространственные ресурсы, т.е. линейные и угловые размеры.

Определения размерных цепей по сути являются интуитивно построенными смысловыми конструкциями, не отражающими объективных причин образования из "совокупности размеров" в "решении поставленной задачи" без указания процесса, в котором она возникает.

Известно, что сами размеры и размерные связи элементов деталей, сборочных единиц и т.п. присущи им объективно как характеристики их пространственной формы существования и могут назначаться субъектом как один из единственно возможных вариантов для описания их конфигурации по его усмотрению.

Любая совокупность накопленных (в прямом процессе как векторы со знаком "+") и израсходованных (в обратном процессе как векторы со знаком "–") ресурсов образует в приведенных определениях размерных цепей "замкнутый контур" или, в общем случае, ориентированный граф с простым циклом.

Так, один из наглядных примеров отсутствия какого-либо обоснованного описания понятия размерной цепи приведен в работе [6], где указывается, что "в общем случае расположенные последовательно по замкнутому контуру размеры (относительные повороты) принято называть **размерной цепью**".

Однако необходимость рассмотрения здесь размерной цепи как частного случая по отношению к ресурсным цепям была вызвана, в первую очередь, тем, что к настоящему времени вся методология размерного анализа в части методов и математического аппарата и вида решаемых задач глубоко разработана и может быть успешно применена при расчете разного вида ресурсных цепей.

Тогда в общем случае иерархическую структуру уровней ресурсных цепей с учетом ряда характеристик представляют укрупненно (рис. 3).

При расчете ресурсных цепей могут решаться два вида задач: проектно-плановая и балансовая. Они соотносятся между собой как прямая и обратная задачи.

Суть проектно-плановой задачи состоит в разложении исходного (накопленного) ресурса на его составляющие элементы (т.е. звенья, части). Балансовая задача заключается в сложении составляющих (израсходованных) ресурсов для определения общего исходного (начального) ресурса.

Ориентированные ребра графа, образующие цепи, могут характеризоваться как номинальные звенья составляющих ресурсов, а с учетом наличия отклонений от них, как предельные звенья составляющих ресурсов, имеющие допуски.

При этом из самого определения ресурсной цепи следует, что сумма всех номинальных значений ресурсов составляющих ее звеньев (с учетом степени их влияния на исходное, т.е. замыкающее, звено в решаемой задаче) равна нулю:

$$\sum_{i=1}^{m} \xi_i A_i = 0,$$

где A_i – номинальное значение i-го звена ресурсной цепи;

ξ_i – передаточное отношение i-го звена ресурсной цепи;

m – число составляющих звеньев ресурсной цепи, включая исходное звено.

При наличии отклонений от номинальных значений составляющих звеньев в ресурсной цепи допуск замыкающего (исходного) звена в ней равен сумме допусков составляющих звеньев:

• при равной возможности появления предельных значений составляющих звеньев ресурсов (метод максимума–минимума):

$$TA_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\zeta_i| TA_i;$$

• при случайном характере распределения отклонений составляющих звеньев ресурсов (теоретико-вероятностный метод):

$$TA_i = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \zeta_i^2 k_i^2 (TA_i)^2},$$

где TA_i – допуск составляющего звена A_i ресурсной цепи;

k_i – коэффициент, характеризующий отличие распределения отклонений i-го звена ресурсной цепи от закона нормального распределения.

Нахождение способов количественного описания связей разного рода ресурсов дает возможность более эффективно управлять человеческой деятельностью на стадиях инновационного процесса.

Таким образом, для осуществления возможности согласования ресурсных цепей одного структурного уровня с цепями других структурных уровней требуется система способов их преобразования. Ввиду многообразия видов применяемых ресурсов поиск системы преобразования ресурсных цепей возможен только на более общих основаниях научного познания окружающего мира и человеческой деятельности, а этому в большей степени отвечает аксиоматический метод.

Согласно работе [7] для ресурсных цепей такой метод может быть реализован через систему способов их преобразования в виде групповой аксиоматики с соблюдением основополагающих принципов развития природы и общества, например, таких, как принципы системности, сохранения, соединения и разъединения, неопределенности, действия (необходимости затрат ресурсов) и др.

• Любое математическое действие над числами по сути отражает законы сохранения количественных отношений между ними, которые будучи преобразованными в равенства, можно представить в виде ресурсной цепи. Например:

сложение:	$5 + 2 = 7$	или	$5 + 2 - 7 = 0$;
вычитание:	$5 - 2 = 3$	или	$5 - 2 - 3 = 0$;
умножение:	$7 \times 2{,}5 = 17{,}5$	или	$\ln 7 + \ln 2{,}5 - \ln 17{,}5 = 0$;
деление:	$7{,}5 : 3 = 2{,}5$	или	$\ln 7{,}5 - \ln 3 - \ln 2{,}5 = 0$.

• Любая ресурсная цепь со звеньями определенной размерности может быть преобразована в количественную (т.е. безразмерную) цепь путем деления каждого звена на единицу размерности.

• В ресурсной цепи замыкающее звено может быть равным нулю. В этом случае ресурсная цепь состоит из двух разнонаправленных, т.е. коллинеарных векторов (звеньев), и выражается, например, равенством 4–4–0=0.

• Со звеньями ресурсной цепи можно производить операции умножения или деления на какое-либо постоянное число или на постоянную величину с заданной размерностью. Возьмем, например, равенство 27–18–9=0 и при делении его на три при тождественном преобразовании получим равенство 9–6–3=0, а при умножении каждого члена этого равенства на постоянную величину, например 4м, получим 36м–24м–12м=0.

• Составляющие звенья ресурсных цепей могут быть представлены в виде чисел или функций с независимой переменной (аргументом) одной размерности. Так, например, равенство 8–6–2=0 может быть преобразовано в равенства: $8x–6x–2x=0$; $8x^2–6x^2–2x^2=0$.

• Все известные законы (зависимости), количественно описывающие связи между параметрами элементов какой-либо системы, при преобразовании их в равенства могут быть представлены в виде ресурсных цепей. Например, системные законы функционирования инновационного процесса можно представить в виде следующих равенств.

Закон аддитивности процесса труда:

$$P_{ai} + P_{bi} - 1 = 0,$$

где P_{ai} – вероятная доля физического труда в i-й момент времени;

P_{bi} – вероятная доля умственного труда в i-й момент времени.

Закон кванта действия в процессе труда:

$$\Delta E \Delta t - nh = 0,$$

где ΔE – квант энергии;

Δt – время действия кванта энергии;

h – постоянная кванта действия;

n – целое число.

Закон запаздывания освоения знания:

$$\Delta q_0 \Delta t_0 - \Delta q_i \Delta t_i = 0,$$

где Δq_0 – скорость прироста научного знания за время Δt_0;

Δq_i – скорость прироста освоения (материализации) научного знания на i-й стадии инновационного процесса за время Δt_i.

• Отдельные ресурсные цепи (например, вещественные, энергетические, информационные) могут быть преобразованы в соответствующие эквивалентные стоимостные цепи. Преобразование определенной ресурсной цепи производят путем операции умножения номинальных значений всех звеньев цепи на соответствующие денежные эквиваленты (например, рубль, доллар, евро и т.п.) или на единицу их измерения (например, килограмм, джоуль, килобайт, час и т.п.).

• Все процессы человеческой деятельности, протекающие в замкнутом цикле "цель – средство – предмет труда – результат" и связанные с затратами вещества, энергии и информации, можно описать комплексом (совокупностью) соответствующих ресурсных цепей. Такое положение в целом можно объяснить законом сохранения, т.е. балансом затрат общего ресурса на его полезную часть и потери.

• Любая сетевая модель связи элементов системы (например, сетевой график событий, графы линейных связей элементов детали и т.д.) с количественными показателями (например, временными, пространственными, стоимостными и др.) может быть представлена в виде комплекса (совокупности) разного рода ресурсных цепей.

Выводы

На основе проведенного анализа по установлению закономерно возникающих связей между применяемыми и получаемыми ресурсами в процессе человеческой деятельности можно заключить следующее:

• всякая человеческая деятельность циклична и представляет собой совокупность последовательно совершаемых элементарных трудовых актов, при осуществлении которых постоянно задействована цепь системных ресурсов (т.е. цель, средство труда, предмет труда, результат), образующих между собой связи в виде полного ориентированного графа;

• каждый полный ориентированный граф, отображающий реализацию элементарного трудового акта, может быть разложен на отдельные графы с простым циклом;

• любой ориентированный граф с простым циклом, ребра которого выражают значения конкретного вида ресурса, практически отражает собой определенную ресурсную цепь;

• использование расширенного толкования термина "ресурс" позволило на основе системной методологии дать определение ресурсной цепи, по отношению к которому все известные определения цепей, например, размерной, электрической, эконометрической и др. являются частными случаями;

• ресурсные цепи в виде равенства отражают количественные отношения внутри совокупности взаимосвязанных ресурсов, участвующих в каком-либо процессе их накопления (т.е. сборки, соединения и т.п. в прямом процессе) или расходования (т.е. разборки, разъединения и т.п. в обратном процессе);

• приведенная групповая аксиоматика преобразования ресурсных цепей может служить универсальным инструментом управления разного

рода ресурсами во многих сферах человеческой деятельности при решении проектно-плановых и балансовых задач.

Список литературы

1. **Григорьев В.С.** Теоретическое обоснование действия закона аддитивности процесса труда // Системность и эффективность инновационной деятельности общества: Сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Пенза: ПДЗ, 2005. С. 25–30.

2. **Клименко А.В.** Основы естественного интеллекта. Рекурентная теория самоорганизации. Версия 3. Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 1993. 304 с.

3. **Григорьев Д.В., Григорьев В.С.** Роль управления в элементарной модели труда // Актуальные проблемы регионального управления: Сб. материалов Межрегиональной науч.-практ. конф. Пенза: ПДЗ, 1998. С. 29–30.

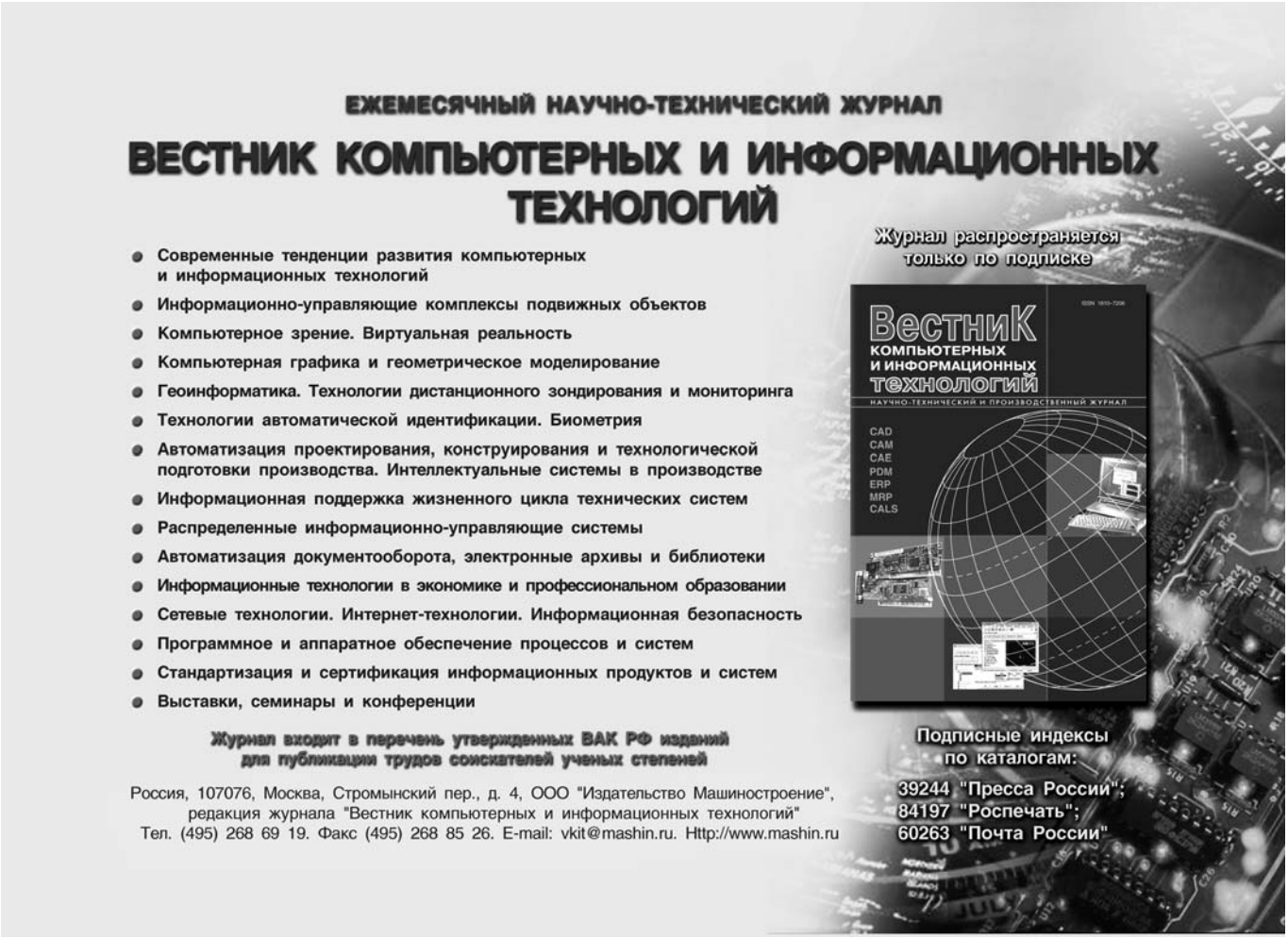
4. **Григорьев В.С.** Обобщенная синергетическая модель инновационного процесса // Университетское образование: Сб. статей IX Междунар. науч.-метод. конф. Пенза: ПДЗ, 2005. С. 388–390.

5. **II Междунар. науч.-практ. конф.** Пенза: ПДЗ, 2005. С. 95–99.

6. **Взаимозаменяемость,** стандартизация и технические измерения: Учебник для вузов / А.И. Якушев, Л.Н. Воронцов, Н.М. Федотов. 6-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 352 с.

7. **Махаринский Е.И., Горохов В.А.** Основы технологии машиностроения: Учебник. Мн.: Выш. шк., 1997. 423 с.

8. **Григорьев В.С., Григорьев Д.В.** Преобразование эконометрических цепей при описании связей параметров изучаемых объектов // Университетское образование: Сб. материалов IV Междунар. науч.-метод. конф. Пенза: ПДЗ, 2000. С. 61–64.



УДК 62-251-755.001.24:006.354

Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения* *(по материалам ГОСТ 22061–76). Продолжение***

Настоящий стандарт устанавливает классы точности балансировки для жестких роторов изделий, а также требования к балансировке и методы расчета дисбалансов.

Стандарт соответствует международному стандарту ИСО 1940 в части содержания и классов точности балансировки с 1 по 11. Термины и определения – по ГОСТ 19534–74 и ГОСТ 16504–81.

Приложение 4
Рекомендуемое

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ

1. Дисбалансы являются векторными случайными величинами и имеют двухмерное рассеивание, так как характеризуются значением и углом или проекциями на две взаимно-перпендикулярные оси.

Измеренные у большого числа однотипных роторов, изготовляемых и собираемых в практически одинаковых условиях, значения и углы дисбалансов можно нанести на плоскость, используя полярную систему координат (рис. 7).

При числе измерений $N \to \infty$ дисбалансы одного значения с радиусом r должны равномерно распределяться вокруг начала координат, а значения дисбалансов (т.е. длины радиусов) вдоль любого радиуса постоянного угла φ должны быть распределены по некоторому закону.

2. Если перпендикулярно к плоскости, в которой отложены векторы дисбалансов (см. п. 1, Приложение 4), из концов каждого из векторов откладывать частоту появления дисбаланса данного значения, то в системе координат XYZ получим поверхность, которую называют *поверхностью распределения.*

Примечание. Число событий A в K испытаниях называют частотой события, а отношение частоты к числу K – частостью события.

Вместо угла и значения дисбаланса можно откладывать его проекции на две взаимно-перпендикулярные оси и иметь дело не с вектором, а со скалярами.

3. Из теории вероятностей известно, что, если величины x, y (проекции вектора дисбаланса), определяющие двухмерную случайную величину

* Редакция 1993 г.

** Начало см. журнал "Сборка в машиностроении, приборостроении", №4, 2008.

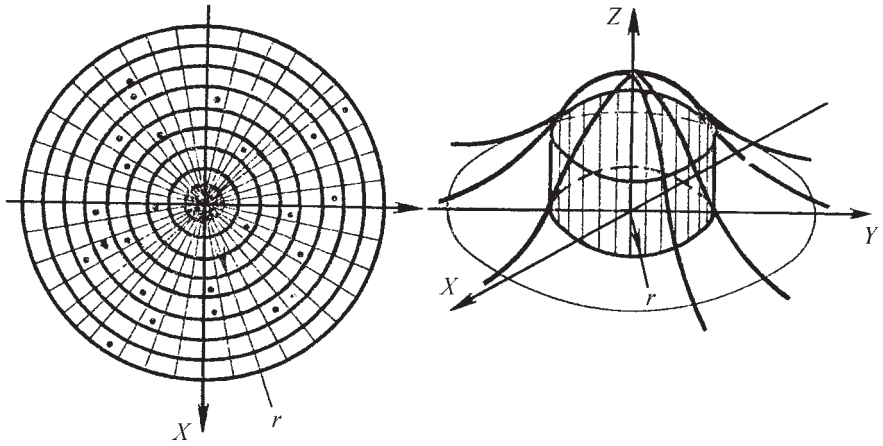


Рис. 7. Значения и углы дисбалансов, нанесенные на плоскость в полярной системе координат

(вектор дисбаланса), распределены на плоскости по закону Гаусса, то длина вектора дисбаланса распределена по закону Рэлея.

Если обе проекции имеют одинаковые среднеквадратические отклонения

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(x_{\text{ср}} - x_j)^2}{m-1}};$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(y_{\text{ср}} - y_j)^2}{m-1}},$$

а их средние значения

$$x_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^{m} x_j}{m}; \; y_{\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^{m} y_j}{m}$$

равны нулю, то поверхность распределения (см. рис. 7) будет симметричной относительно вертикальной центральной оси z.

4. Закон распределения Гаусса для проекций дисбалансов и закон Рэлея для его длины – лишь один из возможных частных случаев приближения известных из опыта зависимостей вероятности от дисбаланса.

Метод статистической обработки результатов контроля основан на теореме Ляпунова и неравенстве Чебышева, что при $N \to \infty$ распределение среднего арифметического приближается к закону Гаусса, а истинное значение случайной величины – к ее математическому ожиданию.

5. В практике балансировки иногда по результатам исследования случайной выборки из всей партии роторов приходится делать заключение о всей партии.

На основании упомянутой теоремы это заключение делают с некоторой вероятностью $W < 1$ (в дальнейшем называемой доверительной вероятностью).

Значение W обычно выбирают равным: 0,90; 0,95; 0,98; 0,99 или 0,999 и указывают в технической документации.

Рассмотрим ряд примеров.

6. Определим для п. 4.2 настоящего стандарта объем случайной выборки, т.е. число N роторов, которые нужно проверить, чтобы с доверительной вероятностью W утверждать, что, если у этих N роторов измеренные начальные дисбалансы $D_{A,\,B\,\text{нач}\,j}$ ($j = 1, 2, ..., N$) в плоскостях опор A и B меньше допустимых, то и у остальных роторов всей партии они также меньше допустимых.

Число N вычисляют следующим образом.

6.1. Выбирают предварительное число роторов $m \geq 5$ и измеряют их начальные дисбалансы $D_{A,\,B\,\text{нач}\,j}$.

Значения коэффициента Стьюдента *t*

$m-1$	W				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
1	6,314	12,706	31,821	63,657	636,600
2	2,920	4,303	6,965	9,925	31,600
3	2,353	3,182	4,541	5,841	12,922
4	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	1,943	2,447	3,143	3,707	5,950
7	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	1,812	2,228	2,764	3,169	4,587
12	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
14	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
16	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
18	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
20	1,725	2,086	2,528	2,845	3,849
22	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
24	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
26	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
28	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
30	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

6.2. Вычисляют средние арифметические значения дисбалансов этих роторов для каждой из плоскостей опор *A* и *B*:

$$D_{A,\,B\,\text{ср}} = \frac{\sum_{j=1}^{m} D_{A,\,B\,\text{нач}\ j}}{m}.$$

6.3. Вычисляют для каждой из плоскостей опор *A* и *B* квадраты среднего квадратического отклонения, формулы которых идентичны для любого распределения:

$$\sigma^2_{A,\,B} = \frac{\sum_{j=1}^{m} (D_{A,\,B\,\text{ср}} - D_{A,\,B\,\text{нач}\ j})^2}{m-1}.$$

6.4. По таблице находят коэффициент Стьюдента $t = t(W, m-1)$, зависящий от принятых W и m.

6.5. Вычисляют искомое число N по формуле для каждой из плоскостей опор *A* и *B*:

$$N_{A,\,B} = \frac{t^2 \sigma^2_{A,\,B}}{(D_{A,\,B\,\text{доп}} - D_{A,\,B\,\text{ср}})^2},$$

где $D_{A,\,B\,\text{доп}}$ – допустимый дисбаланс ротора. Принимают наибольшее из двух найденных значений.

Примечание. Число $N_{A,\,B}$ может быть уточнено путем повторения расчета по пп. 6.2–6.5 для количества проконтролированных роторов, большего, чем выбрано по п. 6.1.

7. Результаты эксперимента с N роторами могут быть использованы для установления с доверительной вероятностью W окончательных значений функциональных дисбалансов.

Это производят в следующем порядке.

7.1. Вычисляют среднее значение функциональных дисбалансов в плоскостях коррекции *1* и *2* опытной партии (j = 1, 2, 3, ..., N):

$$(D_{1,2\,\text{ф}})_{\text{ср}} = \frac{\Sigma (D_{1,2\,\text{ф}})_j}{N}.$$

7.2. Вычисляют среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_{1,2} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N} [(D_{1,2\,\text{ф}})_{\text{ср}} - (D_{1,2\,\text{ф}})_j]^2}{N-1}}.$$

7.3. По таблице находят коэффициент Стьюдента $t = t(W, N-1)$ для принятых W и N.

7.4. Для всей совокупности новых изделий за значения функциональных дисбалансов принимают следующие:

$$D_{1,2\,\text{ф}} = (D_{1,2\,\text{ф}})_{\text{ср}} - t\frac{\sigma_{1,2}}{\sqrt{N}}.$$

Примечание. Грубые ошибки должны отбрасываться при обработке опытных данных, иначе они сильно исказят результат. При этом следует пользоваться СТ СЭВ 545–77.

Пример. Необходимо определить 10%-ные пределы (с вероятностью $W = 0{,}90$) для отклонения выборочной средней величины $\overline{X}$ от среднего значения a при объеме выборки 15 шт., если параметр σ оценивают по данным той же выборки.

Имеем: $m - 1 = 15 - 1 = 14$, $W = 90/100 = 0{,}90$, $t = 1{,}761$ и потому

$$-1{,}761\frac{\sigma}{\sqrt{15}} < \overline{X} - a < +1{,}761\frac{\sigma}{\sqrt{15}}.$$

(Продолжение следует.)

Новая книга!

Справочник токаря-универсала / под ред. М.Г. Шеметова и В.Ф. Безъязычного. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2007. 576 с.: ил.

Цена 440 руб. с НДС.

Изложены сведения о процессах и режимах резания, нормировании токарных работ. Приведены методы повышения производительности труда, технические характеристики оборудования, описание технологической оснастки и инструмента, данные по обработке особо сложных деталей. Приведены сведения из опыта работы отечественных и зарубежных промышленных предприятий.

Второе издание (1-е изд. 1987 г.) переработано в соответствии с современной научно-технической документацией и дополнено сведениями об обеспечении точности и управлении качеством при токарной обработке. В приложении более развернуто представлен материал о повышении качества поверхности методами пластического деформирования.

Для токарей-универсалов всех отраслей промышленности, может быть полезен учащимся учреждений среднего профессионального образования.

ИНФОРМАЦИЯ

Федеральное агентство по образованию,
Московский государственный технический университет "МАМИ",
Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",
Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева,
Институт перспективных технологий машиностроения,
Журнал "Сборка в машиностроении, приборостроении"

приглашают Вас принять участие
в работе научно-технического семинара

"Современные технологии сборки",

который будет проходить в МГТУ "МАМИ" 23–24 октября 2008 г.

Тематика семинара:
1. Современные методы сборки.
2. Автоматизация сборочных работ.
3. Обеспечение качества сборки.

Наш адрес: 107023, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38, кафедра "Технология машиностроения"
Тел. (495) 369-96-26

Зинина Инна Николаевна
E-mail: zin_ina@mail.ru
Факс: (495)369-96-26

м. Электрозаводская, 5 мин. пешком по Б. Семеновской ул.

ЗАО "ОРЛЭКС" приглашает организацию для выполнения работ по проектированию и изготовлению робототехнического комплекса (РТК), включающего робототехнические линии по изготовлению сборочных единиц (узлов), и сборке, регулировке, испытанию датчиков-реле температуры для домашних холодильников с последующим проведением пусконаладочных работ и сопровождением (поставкой запчастей) РТК.

Для проведения работ предоставляются чертежи, ТУ, инструкции по сборке, регулировке, проведению приемосдаточных испытаний, действующих техпроцессов сборки, регулировки и испытаний датчиков-реле температуры.

Годовая программа выпуска датчиков-реле температуры около 5 млн шт. Технико-экономическое обоснование РТК – в процессе совместной разработки технического задания.

302000, г. Орел, ул. Ломоносова, д. 6
Тел. (4862)41-86-67, 8-960-647-35-91

Юрий Владимирович Селезнев

Ордена Трудового Красного Знамени ОАО "Издательство **"Машиностроение"**, 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **E-mail: mashpubl@mashin.ru**; редакции журнала: **sborka@mashin.ru; www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (495) 268-38-42; тел./факс (495) 268-85-26; факс 269-48-97.
Технический редактор *Тупталов С.Ю.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 09.04.08 г. Подписано в печать 30.05.08 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,03. Заказ 488. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ОАО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.