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

8 2009 (109)

СОДЕРЖАНИЕ

Ресурс машин и конструкций

Болотин В.В. Прогнозирование и нормирование ресурса машин 3

Современные технологии сборки

Шпилев А.М., Хвостиков А.С., Марьин Б.Н. Технология выполнения высокоресурсных болтовых соединений 8

Прилуцкий В.А. Автоматизация сборки зубчатых передач 13

Безъязычный В.Ф., Непомилуев В.В. Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления 18

Технологическая оснастка для сборки

Житников Б.Ю., Воркуев Д.С. Разработка кинематической схемы многошпиндельного гайковерта на основе муфты предельного момента, дифференциальных механизмов и механизмов свободного хода для четного числа шпинделей 26

Сборочное оборудование и его элементы

Божкова Л.В., Воловов М.В. Оптимизация программного управления сборочным роботом с пассивной адаптацией 31

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Макушин А.А., Зубков Е.В., Илюхин А.Н. Применение нечеткой логики для моделирования режимов испытаний двигателей внутреннего сгорания 39

В помощь конструктору, технологу

Черменский О.Н., Федотов Н.Н. Монтаж, демонтаж и обслуживание подшипников качения 45

Технологичность конструкции

Проектирование технических средств обработки данных с учетом требований автоматизации сборки 47

Нормативные документы

Болты, винты и шпильки. Механические свойства по ГОСТ Р 52627–2006 55

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.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: sborka@mashin.ru; tsmm@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
А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор)
А.А. ГУСЕВ
М.В. ВАРТАНОВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ
И.Н. ЖЕСТКОВА (зам. главного редактора)
И.Н. ЗИНИНА
Ю.Л. ИВАНОВ
Ю.Г. КОЗЫРЕВ
А.И. КУМЕНКО
А.В. МЕДАРЬ
Е.А. МИКРИН
Ю.Ф. НАЗАРОВ
В.В. ПОРОШИН
Б.В. ШАНДРОВ
А.А. ШАТИЛОВ
А.Г. ХОЛОДКОВА
Г.А. ЯРКОВ

Региональные редсоветы

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.Н. 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, Л.Д. ПАРШЕНКОВА

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”, 2009

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

8 2009 (109)

CONTENTS

Service life of machinery and constructions

Bolotin V.V. Forecasting and normalization of machine resource . . . 3

Modern technologies in assembly

Shpilev A.M., Hvostikov A.S., Marjien B.N. The Highly resort bolted joints realization technology . . . 8

Prilutsky V.A. Automation of assembly of tooth gearings . . . 13

Bezjazichnij V.F., Ntpomiluev V.V. Certain problems of modern assembling and prospect methods of their solution . . . 18

Technological equipment for assembly

Zhitnikov B.Y., Vorkuyev D.S. Development of the kinematics of the multi-spindle nut-setter on the torque limiting clutch, differentials and free-wheeling mechanisms for an even number of spindles . . . 26

Production tools and machinery for assembly

Bojkova L.V., Volovov M.V. Optimization of program management of assembly robot with passive adaptation . . . 31

Quality assurance. Testing. Monitoring

Makyshin A.A., Zubkov E.V., Iluchin A.N. Using fuzzy logic for modeling regimes of testing internal-combustion explosion engines . . . 39

Industrial and desing engineer's aid

Chermensky O.N., Fedotov N.N. Mounting, dismounting and service of roller bearings . . . 45

Manufacturability of a construction

Designing of means of data processing taking into account requirements of automation of assemblage . . . 47

Command papers

Bolts, screws and studs. Mechanical properties . . . 55

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.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.
http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru; tsmm@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
VASIL'EV A.S. (Chief editor)
VARTANOV M.V.
DALSKY A.M.
GUSEV A.A.
ZHESTKOVA I.N. (Deputy chief editor)
ZININA I.N.
IVANOV YU.L.
KOZYREV YU.G.
KUMENKO A.I.
MEDAR' A.V.
MIKRIN E.A.
NAZAROV Yu.F.
POROSHIN V.V.
SHANDROV B.V.
SHATILOV A.A.
KHOLODKOVA A.G.
YARKOV G.A.

Regional editors

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.N.
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., PARSHENKOVA L.D.

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", 2009

УДК 621.01:539.4

В.В. Болотин, *акад. РАН*
Тел. (499)268-3842

Прогнозирование и нормирование ресурса машин*

Даны понятия технического ресурса машин и срока их службы. Освещено экономическое значение проблемы ресурса. Рассмотрены вопросы прогнозирования ресурса, надежности и безопасности машин и механики их разрушения.

Приведены экономико-математические модели для нормирования показателей надежности, а также данные по нормированию срока службы и ресурса.

Concepts of a technical machine resource and their service life are given. Economic value of a problem of a resource is covered. Questions of forecasting of a resource, reliability and safety of machine and mechanics of their destruction are considered.

Economic-mathematical models for normalization of indicators of reliability, and also the data on service life and resource normalization are resulted.

Ключевые слова: прогнозирование, нормирование, ресурс машин, срок службы.

Key words: forecasting, normalization, mashine resourse, servis life.

Проблема безопасности машин и конструкций

Многие машины и конструкции следует рассматривать как источники повышенной опасности для людей и (или) окружающей среды. Это неизбежный побочный результат научно-технического прогресса. Наблюдаются неуклонное увеличение скоростей на транспорте, повышение энерговооруженности в промышленности, создаются уникальные по размерам и мощности комплексы для производства электрической энергии, для добычи и транспортирования нефти и газа и др. Все это приводит к новой постановке проблемы обеспечения безопасности.

Проблема безопасности в технике, рассматриваемая в целом, выходит за круг вопросов, связанных с надежностью и, в частности, ресурсом технических объектов. Значительное место в проблеме безопасности занимает безопасность при нормальной эксплуатации. Однако во всех случаях, когда возникновение опасности для жизни и здоровья людей и (или) для окружающей среды вызвано нарушениями работоспособности объекта, т.е. его отказом, необходимо особое внимание уделять обеспечению безотказности. Такие отказы должны быть либо исключены посредством технических и организационных мер, либо вероятность их возникновения в течение нормативного срока службы должна быть снижена до минимума.

В международных документах отказы, приводящие к тяжелым последствиям, отнесены к категории "критических". Термин "авария" имеет в инженерной практике слишком широкий смысл: к авариям обычно относят все отказы, устранение последствий которых требует значительных затрат времени или труда. Термин "катастрофа" употребляют для исключительных по своим последствиям явлений, носящих характер массовых бедствий. Английский термин "accident" (происшествие, несчастный случай), возможно, наиболее точно определяет класс отказов, связанных с потенциальной или реальной опасностью.

Используем термин авария, относя к авариям все отказы, наступление которых связано с угрозой для людей и (или) окружающей среды, а также с серьезным экономическим и (или) моральным ущербом. Соответствующие технические состояния объектов будем называть аварийными.

Аварии могут быть вызваны различными причинами, однако все они выходят за пределы расчетного уровня нагрузок, нормативных условий технического обслуживания и т.п. Аварии могут быть связаны как с исключительными воздействиями (ударными нагрузками, ураганами, наводнениями, пожарами), так и с неблагоприятным сочетанием обычных нагрузок с весьма малой

* Начало в № 7 за 2009 г.

вероятностью появления. Исходной причиной аварий могут служить крупные ошибки, допущенные при проектировании, расчете, изготовлении, монтаже, эксплуатации и техническом обслуживании, а также сочетания этих ошибок с неблагоприятными внешними условиями, не зависящими от технического персонала.

Повышенный интерес общественности вызывает безопасность эксплуатации атомных реакторов и особенно атомных электростанций (АЭС). В настоящее время в мире функционирует свыше 400 атомных энергетических реакторов с суммарной мощностью около 300 ГВт. Атомная энергетика удовлетворяет около 16 % мировых потребностей в электроэнергии. Выработка энергии на АЭС в некоторых промышленно развитых странах превышает половину от суммарного производства электроэнергии. Ожидается, что общее число энергетических реакторов и доля энергии, вырабатываемой на АЭС, в ближайшие десятилетия будут возрастать.

Основной тип гипотетической аварии атомного реактора – плавление активной зоны с неконтролируемым выбросом радиоактивных продуктов в атмосферу. В практике эксплуатации АЭС зафиксированы две такие аварии. К моменту аварии на АЭС "Три Майл Айленд" (США, 1979 г.) суммарная наработка энергетических реакторов во всем мире составила около 2500 реакторолет. Таким образом, апостериорная оценка вероятности такой аварии по состоянию на 1979 г. составляла $4 \cdot 10^{-4}$ на один реактор в год. В связи с анализом причин и последствий этой аварии комиссия США по атомной энергетике в рекомендациях поставила условие, чтобы вероятность повторения таких аварий не превышала 10^{-4} на один реактор в год, а условная вероятность неконтролируемых выбросов при таких авариях не превышала 10^{-2}. К моменту аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) суммарная наработка энергетических реакторов составила около 4000 реакторо-лет, т.е. порядок апостериорной оценки вероятности не изменился. Последствия этой аварии обусловили необходимость пересмотра концепций проектирования АЭС, чтобы сделать повторение подобных аварий практически невозможным событием.

Ряд источников повышенной опасности в малой степени зависит от человека. К ним относятся природные воздействия – ветровые, сейсмические и волновые нагрузки (последние в подтопляемых зонах). Некоторые воздействия связаны с человеческой деятельностью, но не вполне поддаются контролю. К ним относятся пожары, попадания самолета в здание реактора, взрывы на близлежащих путях сообщения, а также преднамеренные человеческие действия, которые могут привести к серьезным аварийным ситуациям. Задача состоит в том, чтобы путем проектирования и соблюдения правил технической эксплуатации свести до минимума риск возникновения аварийных ситуаций. Так, площадки для строительства атомных электростанций следует выбирать вдали от крупных аэропортов и воздушных коридоров, от районов с повышенной сейсмической активностью или угрозой затопления и т.п. Если неблагоприятный выбор неизбежен, необходимо принимать все доступные меры для повышения уровня безопасности до приемлемых значений.

В связи с возникновением проблемы безопасности атомных электростанций были по-новому поставлены вопросы безопасности традиционных источников энергии, в частности, тепловых и гидравлических электростанций. Индивидуальный риск для людей, проживающих в районе крупной тепловой или гидравлической электростанции, в общем, не меньше, чем для людей, живущих вблизи атомных электростанций, поэтому в последние годы большее внимание уделяют безопасности традиционных источников и способов передачи энергии, например магистральных газо- и нефтепроводов. Современные газопроводы, имеющие диаметр до 1500 мм, функционируют при избыточном давлении газа до 10 МПа и скорости газа до 20 м/с. При разрыве такого трубопровода выделится большое количество энергии, а выброс газа может вызвать пожары и взрывы.

Общий принцип проектирования технических объектов повышенной опасности состоит в том, чтобы исключить возникновение ситуаций, представляющих опасность для людей и (или) окружающей среды, либо уменьшить риск наступления таких ситуаций до значений, сопоставимых с приемлемыми значениями индивиду-

ального естественного риска. В настоящее время существуют различные подходы к определению приемлемого риска. Расчеты на безопасность по отношению к аварийным ситуациям следует проводить с учетом нагрузок при нормальной эксплуатации объекта, а также с учетом повреждений, которые накапливаются в объекте по мере приближения его к предельному состоянию.

Особую роль для обеспечения безопасности технических объектов играет *живучесть конструкции*. С точки зрения безопасности конструктивную схему следует выбирать так, чтобы ее основная (несущая) конструкция и наиболее ответственные элементы сохраняли целостность во время и непосредственно после аварии. Конструкция должна выдерживать эксплуатационные нагрузки при наличии повреждений или разрушений части ее элементов, т.е. должна быть живучей. Нарушение этого требования может стать источником возникновения аварийной ситуации. Вместе с тем весьма велика роль человеческого фактора, в частности, качество подготовки персонала и строгое выполнение им установленных правил технической эксплуатации. Человеческие ошибки в принципе нельзя исключить полностью, поэтому объекты повышенной опасности или повышенной ответственности должны быть отказоустойчивы по отношению к человеческим ошибкам. Этот вид отказоустойчивости является составной частью живучести в широком смысле слова.

Важная роль в обеспечении безопасности технических объектов принадлежит системе прогнозирования индивидуального остаточного ресурса. Эта система позволяет непрерывно следить за техническим состоянием каждого конкретного объекта и действующими на него нагрузками и выдавать рекомендации о дальнейшей эксплуатации объекта. В частности, если результаты обработки диагностических данных показывают, что объект приближается к аварийной ситуации, должно быть принято решение о прекращении его эксплуатации или о переходе на облегченный режим с одновременным принятием мер, обеспечивающих безопасность людей и окружающей среды.

Постановка задачи о прогнозировании ресурса на стадии проектирования

На стадии проектирования должны быть разработаны технические решения, обеспечивающие выполнение объектом всех назначенных функций при высоких показателях эффективности и экономичности. Снижение материальных и трудовых затрат на производство объекта, ускорение его ввода в эксплуатацию обычно служат основными критериями качества проектирования, доводки и отладки. Требования надежности, в том числе безотказности, долговечности, ремонтопригодности и сохраняемости, также входят в число основных критериев. Задача состоит в том, чтобы обеспечить безотказность основных и наиболее ответственных узлов объекта, снизить до минимума вероятность возникновения других отказов, уменьшить продолжительность простоев, связанных с поиском и устранением неисправностей.

Основная задача прогнозирования ресурса на стадии проектирования состоит в согласовании расчетных значений показателей долговечности с заданными (нормативными) значениями. На стадии проектирования предметом прогнозирования служит идеализированный объект – расчетная схема, основанная на изучении предшествующего опыта проектирования и эксплуатации аналогичных объектов, а также на статистических данных о свойствах материалов, элементов узлов и агрегатов. Это относится также к условиям эксплуатации, данные о которых имеют статистический и неполный характер.

Необходимо отметить, что вероятностный характер прогноза обусловлен не только отсутствием исчерпывающей информации о проектируемом объекте, но и разбросом показателей долговечности, чувствительных к различным факторам. Разброс показателей долговечности – неустранимый фактор, который необходимо учитывать как при проектировании, так и на стадии эксплуатации, правильно планируя систему технического обслуживания и планово-профилактических мероприятий.

Несмотря на ожидаемый разброс фактического ресурса, его следует по возможности согласовывать с нормативным ресурсом. Трудность со-

стоит в том, что нормативный ресурс – величина детерминистическая, а прогнозируемый ресурс – случайная. Допустим, что параметры объекта выбраны так, что к моменту выработки нормативного ресурса только 50 % парка достигают предельного состояния, т.е. нормативное значение по парку в целом не реализовано. Необходимо найти значение гамма-процентного ресурса, оптимальное с точки зрения суммарного экономического эффекта. Очевидно, для получения высокой эффективности проектируемых машин следует стремиться к тому, чтобы разброс ресурса был минимальным. С точки зрения организации технического обслуживания иногда выгоднее иметь более компактные распределения ресурса, чем повышенные средние показатели. Кроме того, объект, по возможности, не должен содержать компонентов, средний ресурс которых не согласован с графиком планово-профилактических мероприятий.

Увеличение показателей долговечности всех без исключения элементов, узлов и агрегатов до уровня, установленного для объекта в целом, нерационально и нерентабельно. Часть элементов подлежит замене, ремонту или восстановлению при промежуточных профилактических мероприятиях. Возникает задача о выборе рациональной периодичности средних и капитальных ремонтов, а также о согласовании случайных значений межремонтного ресурса с детерминистически заданной периодичностью профилактических мероприятий. Перечисленные трудности в значительной степени снижаются, если перейти к более прогрессивной системе прогнозирования индивидуального ресурса, при которой каждый объект имеет свой график технического обслуживания.

Задача прогнозирования ресурса, кроме собственно оценки ожидаемых распределений фактического ресурса и изучения факторов, влияющих на эти распределения, включает в себя также традиционный расчет на эксплуатационную надежность. Проверка объекта в целом и его отдельных блоков на безотказность также входит в задачу прогнозирования ресурса. Особое место занимает расчет на безопасность при редко встречающихся интенсивных воздействиях или их сочетаниях. В процессе выработки ресурса общее сопротивление объекта интенсивным воздействиям снижается (вследствие изнашивания, коррозии, роста устойчивых трещин и т.д.). Таким образом, расчет на безопасность и прогнозирование ресурса – это тесно связанные задачи.

Постановка задачи о прогнозировании ресурса на стадии эксплуатации

Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса относится к конкретному, находящемуся в эксплуатации техническому объекту. Основой для прогнозирования служит информация, которую условно можно разделить на три части.

1. Данные текущего (оперативного) поиска дефектов в процессе эксплуатации. Контроль может быть непрерывным или дискретным (например, приуроченным к плановым профилактическим мероприятиям). Для поиска дефектов нужны встроенные и внешние приборы, системы для хранения и переработки диагностической информации, алгоритмы и программы для принятия решений.

2. Данные о нагрузках и других условиях взаимодействия объекта с окружающей средой. Диагностическая информация в принципе ограничена по объему и носит лишь косвенный характер. Существующие средства неразрушающего контроля не позволяют обнаружить все повреждения и трещины, которые в дальнейшем могут стать причиной предельных состояний. Вероятность пропуска дефектов вследствие несовершенства аппаратуры, небрежности оператора или недопустимого расположения дефектов довольно велика. Данные о режимах нагружения служат ценным дополнительным источником информации. По известной истории нагружения с использованием расчетных схем можно оценить степень накопления повреждений в конструкции, а сопоставляя результаты расчета с диагностическими данными, – оценить параметры объекта, которые на предыдущих стадиях еще не были идентифицированы с достаточной точностью. Таким образом, два источника информации – диагностические данные о состоянии объекта и данные об истории нагружения объекта – оказываются тесно связанными и взаимозависимыми.

3. Весь объем априорных данных о материалах, элементах, узлах, нагрузках и т.п., т.е. информация, которая лежит в основе прогнозирования ресурса и оценки показателей надежности на стадии проектирования. Эта информация в принципе относится к генеральной совокупности объектов, в то время как предметом индивидуального прогнозирования служит вполне определенный представитель из этой совокупности. Однако информация об этом представителе остается неполной и неточной, а значительная ее часть имеет вероятностный характер. Например, если внешние воздействия имеют случайный характер, то их изменение на отрезке прогнозирования следует трактовать как случайный процесс. Если удастся объединить априорную информацию с оперативными данными о поведении данного объекта и действующих на него нагрузках, то основанная на этой информации расчетная схема будет более полной и точной, чем априорные расчетные схемы, обсуждаемые на стадии проектирования.

Прогнозирование индивидуального ресурса включает целый комплекс задач: оценку текущего технического состояния объекта, прогнозирование развития этого состояния на ближайшее будущее и выдачу на основании этого прогноза рекомендаций об оптимальном остаточном сроке эксплуатации (до списания данного объекта или его очередного ремонта). Если доступной информации недостаточно для вынесения решений о прекращении эксплуатации, необходимо назначить обоснованный срок очередного диагностирования объекта. Вместе с тем в задачу прогнозирования входит оценка вероятностей возникновения различных отказов с целью их предупреждения.

Еще одна задача индивидуального прогнозирования – оценка риска по отношению к опасным аварийным ситуациям, установление предельно допустимых остаточных сроков эксплуатации при наличии возрастающего риска и выдача рекомендации о мерах по повышению безопасности.

Поскольку прогнозирование остаточного ресурса относится к конкретному, индивидуальному объекту, а прогноз неизбежно содержит элементы вероятностного характера, возникает вопрос о возможности применения вероятностных выводов к индивидуальным объектам и индивидуальным ситуациям. Современная теория вероятностей и математическая статистика традиционно отдают предпочтение статистической интерпретации вероятности как единственному толкованию, имеющему объективный смысл. Аналогичное толкование дают и в системной теории надежности, развитой в первую очередь применительно к массовой продукции, работающей в статистически однородных условиях. Применительно к уникальным объектам приходится использовать менее популярное понятие индивидуальной, субъективной или байесовской вероятности как меры уверенности в истинности суждения. Теория статистических решений почти целиком основана на байесовском истолковании вероятности, причем выводы индивидуального характера базируются на статистической информации, полученной из анализа представительных выборок. Применительно к прогнозированию остаточного ресурса роль статистической информации играют данные о нагрузках, свойствах материалов, соединений и деталей, причем эти данные относятся либо к массовым явлениям, либо к эргодическим процессам. Вероятностное прогнозирование в данном случае представляет собой математическую формализацию интуитивных представлений, которые использует группа экспертов при обсуждении вопроса о возможности дальнейшей эксплуатации конкретного технического объекта.

(Окончание следует)

Библиографический список

1. **Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А.** Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

2. **Фролов К.В.** Методы совершенствования машин и современные проблемы машиностроения. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.

3. **Резиновский А.Я.** Методика обоснованного выбора нормируемых показателей надежности // Надежность и контроль качества. 1987. № 9. С. 13–23.

А.М. Шпилев, А.С. Хвостиков, Б.Н. Марьин *(Комсомольский-на-Амуре ГТУ)*
e-mail: hvostikov_knastu@mail.ru

Технология выполнения высокоресурсных болтовых соединений

Представлены методы обеспечения долговечности болтовых соединений с помощью выбора характера посадки болта в отверстие и упрочняющей обработки отверстий под болты, методы повышения точности и стабильности технологических процессов выполнения соединений. Предложена методика определения диаметра калибрующей поверхности режущего инструмента.

The methods for bolted joints life support due to choice of the seat type and strengthening treatment of bolt holes and also the techniques for accuracy and stability improvement of joints technological processes are presented. The technique for tool gage surface diameter dimension is introduced.

Ключевые слова: болтовое соединение, напряженно-деформированное состояние, допуск, посадка, долговечность.

Key words: bolt joint, deflected condition, tolerance, seat, durability operating.

Надежность сборочных единиц зависит главным образом от надежности и долговечности крепежных элементов, к которым относятся болтовые соединения. В процессе их эксплуатации разрушения возникают главным образом в очагах концентрации напряжений. Ресурс болтовых соединений в большой степени зависит от их конструктивных параметров, способов образования отверстий для этих соединений и установки болтов, характера посадки болта в отверстие и контакта сопрягаемых поверхностей. Следовательно, задача обеспечения заданной долговечности является конструкторско-технологической.

Цель данной работы – определение оптимальных условий для выполнения высокоресурсных болтовых соединений.

Основные конструктивно-технологические параметры, оказывающие влияние на ресурс болтовых соединений, следующие:

- характер посадки болта в отверстие;
- упрочняющая обработка отверстий под болты;
- осевая стяжка сборочной единицы в результате свинчивания болтового соединения;
- точность и стабильность технологических процессов выполнения соединений.

Совокупность конструктивно-технологических параметров болтового соединения должна обеспечивать в его зоне благоприятное с точки зрения долговечности напряженно-деформированное состояние, характер которого определяется:

– действующими эксплуатационными нагрузками и величиной остаточных напряжений, возникших в деталях в процессе обработки отверстий под болты;

– величиной напряжений, вызванных установкой болтов в отверстия с радиальным натягом;

– напряжениями от силы сжатия сборочной единицы в результате свинчивания болтовых соединений.

Для болтовых соединений, работающих на срез, предпочтительным следует считать такой вариант их конструктивно-технологического выполнения, при котором абсолютные значения растягивающих напряжений в деталях минимальны, сжимающих – максимальны, амплитуда действующих локальных напряжений – минимальна.

Оптимальный характер посадки болта в отверстие может быть достигнут путем определения оптимального размера калибрующего диаметра режущего инструмента.

В настоящее время диаметр и допустимые отклонения диаметра калибрующей поверхности инструмента для обработки отверстия определяются исходя из диаметра и требований к точности обрабатываемого отверстия. Поле допуска, в

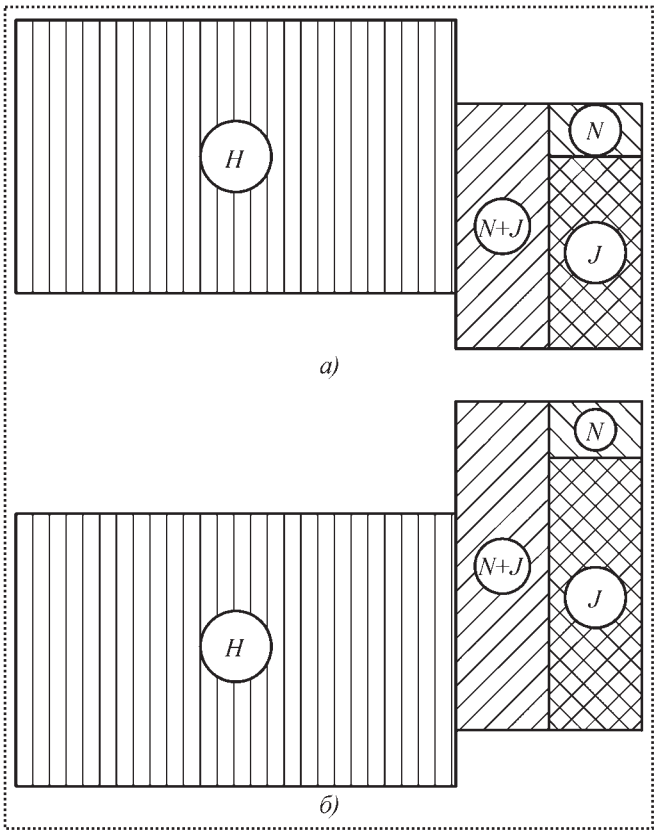


Рис. 1. Схема расположения полей допусков:
а – при сверлении и развертывании;
б – при раскатывании и дорновании;
H – допуск на отверстие;
N+J – допуск на диаметр обрабатывающей поверхности неизношенного инструмента;
N – допуск на диаметр обрабатывающей поверхности изношенного инструмента;
J – допуск на износ

котором изготовлен диаметр калибрующей поверхности инструмента, располагается в зависимости от поля допуска на обрабатываемую поверхность с определенным запасом в большую или меньшую сторону для учета конкретных условий (рис. 1).

Недостатком известного метода является то, что диаметр обрабатываемой поверхности не учитывает механические свойства обрабатываемого материала, длину и другие геометрические параметры отверстия, в частности модуль упругости, оказывающий значительное влияние на фактические отклонения от точности диаметра отверстия. Остаточное после обработки упругое изменение диаметра отверстия снижает точность в различных материалах по-разному. В большей степени этот фактор оказывает влияние на точность обработки отверстий в смешанных пакетах, т.е. в соединениях из разных материалов.

Задача создания конструкции инструмента, учитывающей конкретные характеристики обрабатываемого отверстия, решается тем, что при создании инструмента для конкретного отверстия, используя известный инструмент, проводят пробную обработку на образцах с соответствующими параметрами. Количество пробных наблюдений должно обеспечить возможность статистической обработки результатов по известным методикам.

Предлагаемый инструмент содержит цилиндрическую калибрующую поверхность, диаметр которой и допустимые отклонения от него при обработке зависят от диаметра и требований к точности обрабатываемого отверстия. В отличие от известного режущего инструмента средний диаметр режущей поверхности нового инструмента выполняют с учетом механических свойств материала и геометрических параметров детали, в которой обрабатывается отверстие.

Диаметр D_k калибрующей поверхности режущего инструмента выполняют таким образом, чтобы центр гистограммы распределения размеров, полученных после обработки, располагался по центру допуска отверстия с введением необходимого запаса на изнашивание:

$$D_k = D_{st} + \left(D_g - D_n + \frac{E_s - E_i}{2} \right), \qquad (1)$$

где D_{st} – диаметр калибрующей поверхности стандартного режущего инструмента; D_g – диаметр до центра гистограммы отверстия, полученного после пробной обработки; D_n – номинальный диаметр отверстия; E_s и E_i – его верхнее и нижнее отклонения.

Обработка отверстий под болты резанием (сверлением, развертыванием, протягиванием) не создает в их поверхностном слое значительных остаточных напряжений. Благоприятное напряженно-деформированное состояние достигается применением упрочняющих методов обработки пластическим деформированием материала деталей в зоне отверстия.

К упрочняющим методам обработки отверстий, нашедшим практическое применение, относятся: раскатка, дорнование, чеканка переходных кромок отверстия.

Преимущества метода дорнования по сравнению с раскатыванием роликами:

• простота конструкции дорнов и, соответственно, их низкая себестоимость;

• отсутствие влияния субъективных факторов на качество дорнованных отверстий;

• отклонения размеров отверстий после раскатки превышают предельные отклонения выше *H9*;

• в процессе раскатки необходима периодическая регулировка раскатников для обеспечения заданной точности обработки отверстий, а также выдерживание осевой подачи в пределах 0,4–0,8 мм/об, поскольку раскатывание с меньшей подачей приводит к многократному прокатыванию роликов по одному и тому же месту поверхности отверстия, что вызывает перенаклеп и шелушение поверхности.

Недостатки дорнования:

– необходимость применения специализированного пневмогидравлического механизированного инструмента;

– появление корсетности и, как следствие, снижение точности.

Независимо от метода обработки (дорнование или раскатывание) обеспечивается благоприятное напряженно-деформированное состояние поверхности.

Повышению долговечности потайных болтовых соединений до 0,5–2 раз способствует упрочнение пластическим дорнованием конического гнезда и переходной кромки глубиной *h* под галтель головки болта [1] (рис. 2).

Необходимо отметить, что при установке болтов с натягом методом затягивания за технологический хвостовик коническое гнездо и переходная кромка упрочняются самим болтом. В этом случае применение отдельной операции упрочнения кромки нецелесообразно.

Характер посадки болта в отверстие влияет на распределение напряжений в зоне соединения и тем самым на его работоспособность в условиях переменных нагрузок. В зависимости от характера посадки болтов в отверстия болтовые соединения можно разделить в соответствии с отраслевыми стандартами на четыре группы:

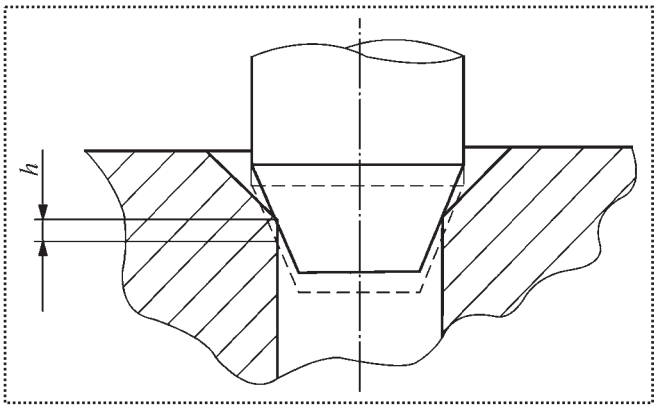


Рис. 2. Пластическая деформация переходной кромки отверстия при упрочнении пуансоном

– с зазором;

– с радиальным натягом до 0,3 %;

– с радиальным натягом до 0,6 %;

– с радиальным натягом от 0,6 до 1,3 %.

Установка болтов с зазором упрощает сборку конструкции и несколько уменьшает трудоемкость выполнения болтовых соединений по сравнению с установкой болтов с натягом. При установке болтов с зазором в неупрочненные отверстия коэффициент концентрации напряжений на кромке отверстия приблизительно равен трем. Несущая способность и долговечность болтовых соединений в этом случае определяются в основном величиной осевого натяга в результате свинчивания соединения [2].

Повысить долговечность болтовых соединений при установке болтов с зазором можно посредством применения упрочняющих методов обработки отверстий под болты. Например, дорнование отверстий позволяет повысить долговечность соединений в три раза.

Болтовое соединение с радиальным натягом создает в зоне соединения наиболее благоприятное с точки зрения долговечности конструкции напряженно-деформированное состояние. При установке болтов с натягом до 0,6 % радиальные напряжения сжатия в соединяемых деталях создаются в основном вследствие их упругой деформации. При установке болтов с большими натягами происходит упругая и пластическая деформация пакета деталей.

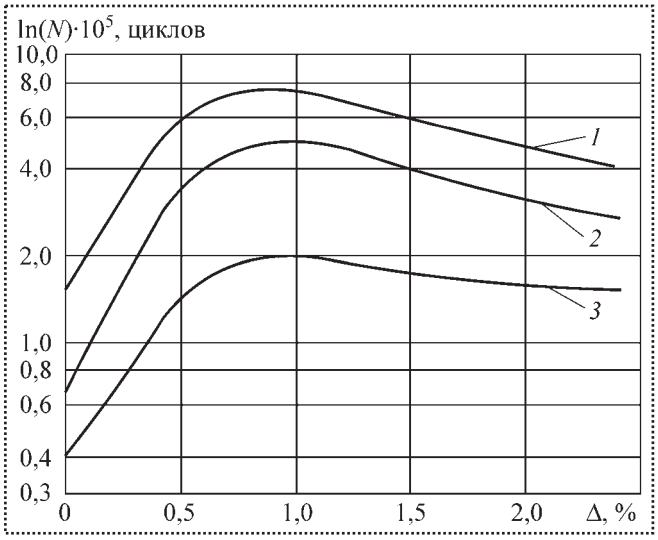


Рис. 3. Зависимость долговечности образцов болтовых соединений от величины радиального натяга в соединении и номинальных растягивающих напряжений при испытаниях:
1 — $\sigma_{ном}$ = 120 МПа;
2 — $\sigma_{ном}$ = 150 МПа;
3 — $\sigma_{ном}$ = 180 МПа

Упругая составляющая деформации достигает 0,8 % при натяге в болтовом соединении, равном 1,3 %. В этом случае радиальные напряжения сжатия в деталях пакета могут достигать 400 МПа, что повышает жесткость соединения на сдвиг и улучшает его усталостные характеристики. Кроме того, установка болтов с этим натягом приводит к снижению тангенциальных напряжений около кромки отверстия при сохранении больших радиальных напряжений сжатия, позволяющих сохранить высокие растягивающие напряжения в контакте болта и стенки отверстия и тем самым увеличить сопротивление усталости соединения. В случае, когда гарантирован силовой контакт болта со стенками отверстия по всему его контуру, коэффициент концентрации напряжений может быть снижен до единицы.

Результаты исследований показали (рис. 3), что при увеличении натяга в болтовом соединении от 0 до 0,5 % наблюдается резкое (до 4 раз) повышение долговечности соединений. При дальнейшем увеличении натяга рост долговечности замедляется, и при натягах более 1 % наблюдается некоторое снижение долговечности соединений. Таким образом, наибольшая долговечность болтовых соединений обеспечивается при установке болтов с радиальным натягом 0,6–1,1 %. В этом случае долговечность соединений в 5–6 раз выше долговечности болтовых соединений с зазором.

Иное влияние на долговечность болтовых соединений с натягом оказывает величина натяга при установке болтов в отверстия, упрочненные дорнованием (см. рис. 3). Дорнование отверстий под болты, устанавливаемые с натягом до 0,5 %, увеличивает, а при установке болтов с бо̀льшим натягом уменьшает долговечность болтовых соединений.

Повышение долговечности при установке болтов с натягом до 0,5 % в дорнованные отверстия обусловлено их упрочнением в результате пластической деформации при дорновании и созданием радиальных сжимающих напряжений в результате упругой деформации деталей пакета при установке болтов.

Рассмотренные выше методы обеспечения заданных ресурсных показателей позволяют оптимизировать конструктивные параметры и технологию их выполнения на основе анализа локальных напряженно-деформированных состояний в зонах вероятного усталостного разрушения и учета влияния технологических аспектов выполнения соединений на долговечность конструкции. Выбор этих параметров целесообразно проводить с учетом результатов анализа трудоемкости сборочных работ и технологической себестоимости выполнения соединений.

В таблице приведены усредненные экспертные оценки влияния метода упрочнения на долговечность и себестоимость выполнения болтовых соединений, показывающие, что наиболее эффективной является установка болтов с натягом 0,6–1,2 %. При использовании этого метода долговечность соединения в 5–6 раз выше, чем при соединении болтами, установленными с зазором в неупрочненные отверстия. Следует заметить, что себестоимость выполнения соединений возрастает всего лишь на 10 %.

Проведенные исследования позволяют утверждать, что прогнозирование долговечности и выбор конструктивно-технологических параметров высоконагруженных болтовых соединений необходимо проводить на начальных этапах проектирования, когда возможен выбор одного из

Посадка болта в отверстие	Метод упрочнения отверстия под болт	Относительные значения	
		долговечности	себестоимости
С зазором	Без упрочнения	1,0	1,0
	Раскатка	1,7	1,7
	Дорнование	2,8–3,3	1,3
	Пластическое деформирование кромки	2,1	1,4
С радиальным натягом от 0,2 до 0,6 %	Без упрочнения	2,2–2,8	1,1
	Дорнование	3,7–4,1	1,2
С радиальным натягом от 0,6 до 1,2 %	Без упрочнения	5,0–6,0	1,1
	Дорнование	4,1–4,4	1,2

двух-трех вариантов методов обеспечения заданной долговечности соединений, например, установка болтов с зазором в дорнованные отверстия или установка с натягом 0,6–1,2 %.

Уточнение метода обеспечения долговечности болтовых соединений проводится на этапах испытаний образцов, имитирующих реальную конструкцию составных частей, отработки конструкции на технологичность и разработки директивных технологических процессов.

Выводы

Выявлено, что для обеспечения долговечности высокоресурсных болтовых соединений наиболее оптимальна посадка с радиальным натягом.

Установлена связь между характером обработки деталей и долговечностью болтовых соединений.

Предложена методика определения диаметра калибрующей поверхности режущего инструмента.

Библиографический список

1. **Урбанский Ю.С., Беспалько В.Н., Федирко В.К.** Упрочнение болтовых соединений из алюминиевого сплава В95 // Прочность и долговечность авиационных конструкций. – 1973, № 6. С. 87–91.

2. **Ярковец А.И., Сироткин О.С., Фирсов В.А., Киселев Н.М.** Технология выполнения высокоресурсных заклепочных и болтовых соединений в конструкциях самолетов. – М.: Машиностроение, 1987. 191 с.

ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ СИСТЕМЫ:

учебное пособие

А.Ю. Выжигин

М.: Машиностроение, 2009 – 288 с. **Цена 462 р. с НДС**

В учебном пособии дано общее представление об организации и элементах ГПС, рассмотрена производственно-техническая структура и основные элементы гибких автоматизированных производств, критерии гибкости ГПС, приведена классификация промышленных роботов и их приводов. Рассмотрены типы и технические средства транспортно-накопительных систем, технические средства и системы управления автоматическими транспортно-накопительными системами. Рассмотрены различные типы складов, методика расчета функционирования складской системы. Описаны системы управления ГАП и системы автоматического контроля, приведены примеры реализации ГПС. Также показаны основные средства автоматизации и пути повышения производительности оборудования в условиях автоматизированного производства. Дополнительно рассмотрены методики расчета динамики некоторых типов пневматических приводов промышленных роботов и их применение в автоматизированном комплексе для многопереходной штамповки.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности "Технология приборостроения". Представляет интерес для широкого круга специалистов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в ООО "Издательство Машиностроение" в отдел продаж, маркетинга и рекламы: по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.75

***В.А. Прилуцкий**, д-р техн. наук (Самарский государственный технический университет)*
e-mail: metod81@yandex.ru

Автоматизация сборки зубчатых передач

Рассмотрены способ управления процессом сборки зубчатых передач и конструкция устройства для его реализации на примере двух вариантов селективной сборки зубчатой передачи шестеренного насоса. Способ позволяет уменьшить в несколько раз штучное время и повысить качество сборки зубчатой передачи.

In the article the way of management by process of assembly of tooth gearings and a design of the device for its realization is described by the example of two variants of selective assembly of a tooth gearing of a gearing the pump. The way allows reducing during some times piece time and to increasing the quality of assembly of a tooth gearing.

Ключевые слова: сборка, зубчатые колеса, система автоматического управления, механизм захвата, датчики зазора.

Key words: assembling, gear-wheels, system of automatic control, mechanism of capture, sensors of gap.

Автоматизация сборки машин и механизмов определяет качество сборки соединений, входящих в них. Закономерности и технологические особенности сборки характерных соединений относятся также к сборке зубчатых передач.

С точки зрения ресурса зубчатой передачи, ее износостойкости, плавности, бесшумности и др. одно из необходимых условий качественной сборки по методу полной взаимозаменяемости – попадание действительных размеров замыкающих звеньев размерной цепи в пределы допуска.

Достаточным можно считать условие, при котором результатом сборки является оптимальное положение симметричных деталей в пределах одного комплекта. Стабилизация погрешностей формы и взаимного расположения поверхностей за счет уменьшения их допусков в большинстве случаев экономически нецелесообразна. Выполнение этих условий обеспечивает повышение качества сборки зубчатой пары по методу индивидуальной селекции.

Важным фактором, оказывающим влияние на работу зубчатой передачи, является наличие бокового зазора между зубьями колес.

В работе [1] описаны два новых способа сборки зубчатой передачи, основанных на индивидуальной селекции соединений зубьев передачи. Первый из них предусматривает полный перебор вариантов контактирования зубьев шестерни и зубчатого колеса. Второй способ сборки основан на создании модели двух пар зацепления и последующем анализе. Этот способ в зависимости от числа зубьев шестерни и зубчатого колеса на порядок и более производительнее первого способа. И все-таки оба они сопряжены с необходимостью выполнения большого объема ручных работ.

Предложен новый, лишенный указанного недостатка способ управления процессом сборки зубчатых передач и устройство (рис. 1) для его осуществления [2]. Этот способ реализован при сборке зубчатой передачи шестеренного насоса и включает следующие действия: нанесение номеров зубьев; установку комплекта входного вала с шестерней *2* и зубчатого колеса *3* в корпус *1* насоса с одновременным их предварительным и окончательным соединением.

При предварительном соединении контролируют боковой зазор при всех возможных сочетаниях сопряжений зубьев шестерни *2* и зубчатого колеса *3* по их номерам. При этом последовательно поворачивают шестерню *2* и зубчатое колесо *3* на один угловой шаг. Каждый раз фиксируют фиксатором *38* положение одного из элементов зубчатой передачи, например, зубчатого колеса *3*, до полного оборота для каждого возможного сочетания сопряжений их зубьев. При окончательном соединении вводят в контакт ту пару зубьев шестерни *2* и зубчатого колеса *3*, для которой математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение бокового зазора наименьшие.

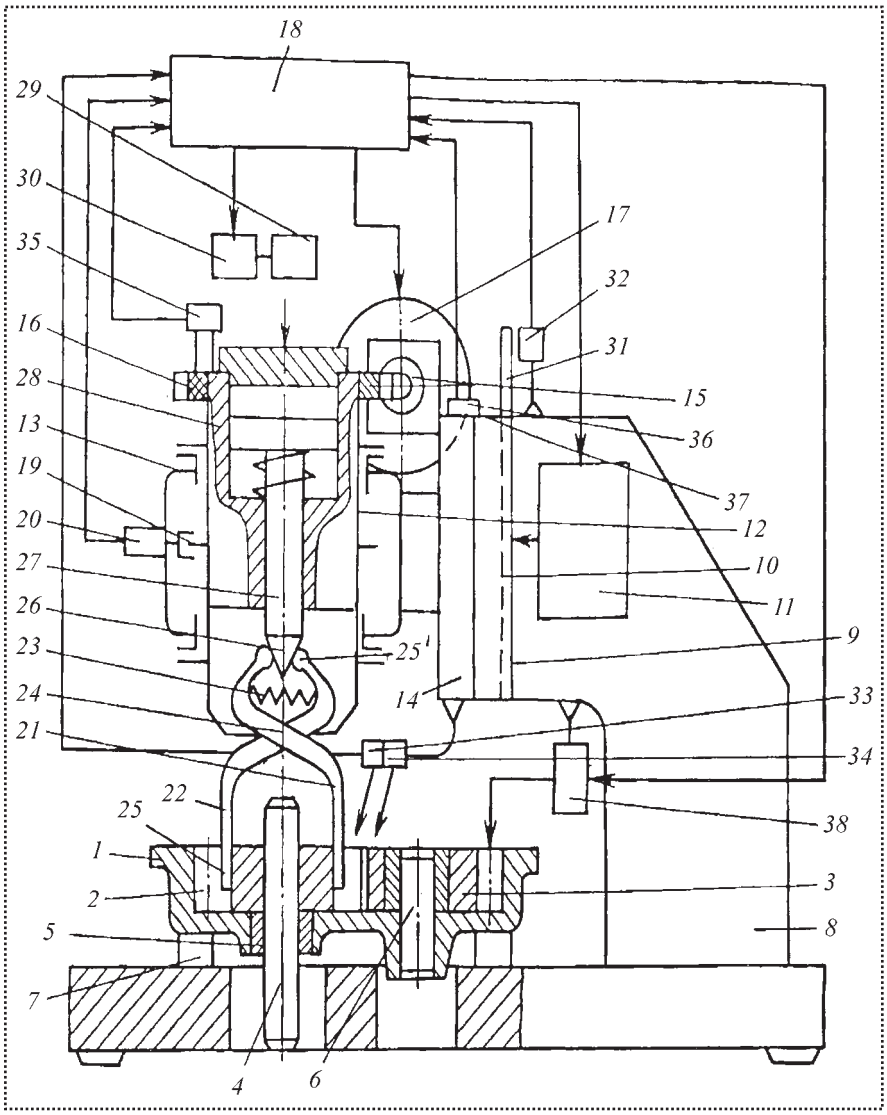


Рис. 1. Схема устройства для автоматизированной сборки зубчатых передач

Контроль бокового зазора выполняют автоматически с помощью захватного механизма, приводимого в действие пневмоприводом, и механизма осевого перемещения шестерни. Величина и направление перемещения задаются от привода возвратно-поступательного движения ползуна *9*. Перемещения ползуна *9* ограничивают по сигналам датчика *32* возвратно-поступательного перемещения шестерни *2* командами системы автоматического управления (САУ) *18*. Контроль бокового зазора на каждом возможном сочетании сопряжений зубьев шестерни *2* и зубчатого колеса *3* выполняют посредством датчика *20*, подающего сигналы о величине бокового зазора в САУ *18*.

Этот способ реализуется с помощью устройства, состоящего из следующих узлов: САУ *18*; механизма захвата шестерни *2*; механизма ее возвратно-поступательного перемещения; пневмоцилиндра *28*; датчиков контроля бокового зазора и возвратно-поступательного перемещения шестерни *2*; датчиков считывания *33*, *34* номеров зубьев; датчика *35* крутящего момента шестерни *2*.

Собираемый данным способом шестеренный насос состоит из корпуса *1* с зубчатой передачей в виде шестерни *2* и зубчатого колеса *3*. Шестерня *2* установлена на входном валу *4*, вращающемся во втулках *5* и *5'* (последняя на рисунке не показана). Шестерня *2* зацепляется с зубчатым колесом *3*, которое вращается на пальце *6*, запрессованном в корпусе *1*.

При сборке шестеренный насос помещают в устройство на установочные элементы *7*. Устройство, расположенное на станине *8*, состоит из механизма возвратно-поступательного движения шестерни *2*, выполненного в виде ползуна *9*, перемещающегося по направляющим *10* станины *8*, привода *11* ползуна *9*, содержащего электродвигатель, передачи, винт с гайкой (условно не показаны). Устройство также включает в себя механизм возвратно-поворотного движения шестерни *2*, выполненный в виде гильзы *12*, поворачивающейся в собственных опорах *13* (подшипниках, установленных в корпусе *14*, упругосвязанном с ползуном *9*).

Поворот гильзы *12* осуществляется через червячную передачу *15*, *16* от шагового электродвигателя *17*. Червячное колесо *16* упруго закреплено на гильзе *12*. Вход шагового электродвигателя *17* соединен электрически с выходом САУ *18*, от которой он получает команды на включение и выключение. На гильзе *12* установлен диск *19* с делениями датчика бокового зазора. Чувстви-

тельный элемент *20* датчика бокового зазора, установленный на корпусе *14*, может фиксировать угол поворота гильзы *12*, а следовательно, шестерни *2*. Его выход электрически связан с входом САУ *18*, в которую он подает сигналы о величине бокового зазора.

Кроме того, устройство снабжено механизмом захвата шестерни *2,* выполненным в виде двух рычагов *21*, *22* клещеобразного исполнения, соединенных пружиной *23*, которые могут одновременно поворачиваться в противоположные стороны вокруг общей оси *24*, закрепленной на гильзе *12*. Рычаги *21*, *22* предназначены для силового замыкания концами длинных плеч *25* на впадине зубьев шестерни *2*, а концами коротких плеч *25'* – на клиновой конец *26* штока поршня *27* пневмоцилиндра *28*, встроенного в гильзу *12*. Пневмоцилиндр *28* через муфту *29* и кран *30* соединен с системой подачи сжатого воздуха. Вход крана *30* связан с выходом САУ *18*. Таким образом, рычаги *21*, *22* механизма захвата шестерни *2* могут сжиматься и разжиматься по командам САУ *18*, тем самым сжимая или разжимая шестерню *2*.

Устройство также оснащено линейкой *31*, установленной на ползуне *9*, и датчиком *32* возвратно-поступательного перемещения шестерни *2*, размещенным на станине *8* с рабочим зазором относительно линейки *31*. Выход датчика *32* фотоэлектрического исполнения соединен с входом САУ *18*. Датчик посылает сигналы о поступательном перемещении шестерни *2*.

Устройство также снабжено датчиками *33, 34* считывания номеров зубьев соответственно шестерни *2* и зубчатого колеса *3* при их повороте вокруг собственных осей. Датчики *33, 34* имеют фотоэлектрическое исполнение. Их выходы соединены с входами САУ *18*.

Кроме того, устройство снабжено датчиком *35* крутящего момента поворота шестерни *2*, выполненным в виде упругой планки с наклеенным на ней чувствительным элементом в виде тензоэлемента. С помощью этой планки червячное колесо *16* упруго установлено на гильзе *12*. Выход датчика *35* электрически связан с входом САУ *18*. Датчик *35* подает сигнал о величине крутящего момента поворота шестерни *2*, сообщаемого ей механизмом возвратно-поворотного движения.

Устройство снабжено также датчиком *36* силы, затрачиваемой на возвратно-поступательное перемещение шестерни *2*. Для этого ползун *9* связан с корпусом *14* посредством пластины *37*. Датчик *36* выполнен в виде тензоэлемента, наклеенного на пластину *37*. Выход датчика *36* электрически связан с входом САУ *18*. Таким образом, датчик *36* подает сигналы в САУ *18* о силе на поступательное перемещение шестерни *2* при ее касании зубчатого колеса *3* и внутреннего торца корпуса *1* насоса.

Имеется также фиксатор *38* углового положения зубчатого колеса *3*. Фисатор *38* электромагнитного исполнения установлен на станине *8* с возможностью перемещения его фиксирующего элемента во впадину зуба колеса *3*. Вход фиксатора связан с выходом САУ *18*. Таким образом, по командам САУ *18* фиксирующий элемент перемещается вовнутрь и из впадины зубьев зубчатого колеса *3*.

Сборку реализуют следующим образом.

Насос без крышки устанавливают в устройство на опоры – установочные элементы *7*. Подводят фиксатор *38* к зубчатому колесу *3,* а датчики *33*, *34* считывания номеров зубьев – в исходное положение. Включают САУ *18*, по команде которой корпус *14* с ползуном *9* и механизмом захвата шестерни перемещаются от привода *11* ползуна по направлению к шестерне *2*.

Далее длинные плечи *25* входят во впадины зубьев шестерни *2* (там, где нет контакта ее зубьев с зубьями зубчатого колеса). Включается насос *29*, и кран *30* открывает сеть воздухопровода сжатого воздуха. Сжатый воздух поступает в пневмоцилиндр *28*, приводит в движение поршень и шток *27*, конический конец *26* которого давит на короткие плечи подпружиненных пружиной *23* рычагов *21*, *22*. Рычаги одновременно поворачиваются вокруг общей оси *24*, закрепленной на пневмоцилиндре *28*, и зажимают шестерню *2*. В этом положении шестерня *2* и пневмоцилиндр *28* составляют одно целое. Затем начинается измерение бокового зазора в зацеплении первой пары зубьев шестерни и зубчатого колеса. Для этого САУ *18* подает команду на включение шагового электродвигателя *17*. Через червячную передачу *15*, *16* и датчик *35* крутящего момента гильза *12* получает вращение в подшипниках *13*, а с ней – захватный механизм шестер-

ни и сама шестерня *2*. Это вращение медленное до той поры, пока датчик *35* крутящего момента не подаст сигнал в САУ *18* о предельном значении, при достижении которого (а происходит это в тот момент, когда противоположная сторона зуба шестерни *2* коснется следующего зуба колеса *3*) вращение гильзы *12*, захватного механизма и шестерни *2* останавливается (по сигналу датчика *35* крутящего момента).

За время медленного вращения шестерни *2* угол ее поворота измеряет датчик бокового зазора, чувствительный элемент *20* которого взаимодействует с диском *19* с делениями. Сигнал о боковом зазоре поступает в САУ *18*. Для обеспечения получения надежных результатов измерения по команде САУ *18* шестерне сообщается медленное вращение в обратную сторону до возрастания крутящего момента до критического значения. Затем остановка вращения, пауза и медленное вращение в первоначальном направлении. Т.е. происходит двоекратное круговое ее покачивание, во время которого продолжается измерение бокового зазора. Таким образом, в САУ *18* поступают сигналы о трех значениях бокового зазора.

После этого фиксатор *38* отводится, и шестерня *2,* а с ней и колесо *3* поворачиваются на следующий угловой шаг зубьев. Фиксатор *38* входит в следующую впадину, и вращение зубчатого колеса *3* останавливается. Далее происходит троекратное измерение бокового зазора аналогично описанному выше при зацеплении первой пары зубьев шестерни и колеса. Так происходят измерения бокового зазора для третьей, четвертой и последующих пар зубьев, пока не будут перебраны все варианты пар зацепления зубьев. Одновременно с измерениями бокового зазора датчики *33*, *34* посылают сигналы в САУ *18* о фактических номерах зубьев, находившихся в зацеплении.

Далее переходят к измерению бокового зазора при сдвиге на один угловой шаг, повторяя все описанные выше действия. Для этого САУ *18* выдает команду на осевое перемещение шестерни *2* путем включения привода *11* ползуна *9*. При этом ползун *9* с корпусом *14*, механизмом захвата шестерни и самой шестерней *2* перемещается в сторону, противоположную корпусу *1* насоса, до полного извлечения из него шестерни *2*.

В этот момент времени по сигналу датчика *32* поступательное движение шестерни *2* прекращается. По команде САУ *18* включается шаговый электродвигатель *17*, который сообщает через червячную передачу *15*, *16* вращательное движение гильзе *12*, механизму захвата шестерни и самой шестерне *2*. Происходит поворот последней на один угловой шаг зубьев, по завершении которого по сигналу чувствительного элемента *20* датчика бокового зазора и команде САУ *18* это движение останавливается. САУ *18* выдает команду приводу *11* ползуна, шестерня *2* опускается и входит в корпус *1* насоса до соприкосновения с его внутренним торцом. По сигналу датчика *36* поступательное движение шестерни *2* останавливается. Начинается второй цикл измерения бокового зазора, т.е. для зацепления второго сочетания зубьев шестерни *2* и зубчатого колеса *3*. Измерения бокового зазора для третьего, четвертого и последующих сопряжений зубьев во втором цикле выполняются аналогично первому циклу.

Величины боковых зазоров хранятся в памяти вычислительного блока САУ *18*, и в конце сборочной операции выполняются необходимые вычисления. Определяется то сопряжение зубьев, для которого математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение бокового зазора наименьшие.

На этом завершается предварительное соединение зубьев шестерни *2* и зубчатого колеса *3*. Для окончательного их соединения по команде САУ *18* шестерня *2* автоматически выводится из корпуса *1* насоса, поворачивается на нужный угол до возможности сопряжения найденной пары зубьев, а затем автоматически вводится в корпус описанным выше образом до сопряжения с зубчатым колесом. Захватный механизм шестерни *2* автоматически отводится в исходное положение, а фиксатор *38* – от зубчатого колеса *3*. Собранный насос снимают с установочных элементов *7* и передают на следующую сборочную операцию. В устройство устанавливают следующий собираемый насос.

Пример конкретного выполнения. Требуется произвести сборку зубчатой передачи шестеренного насоса трактора. Насос должен обеспечить подачу масла к быстроизнашивающимся дета-

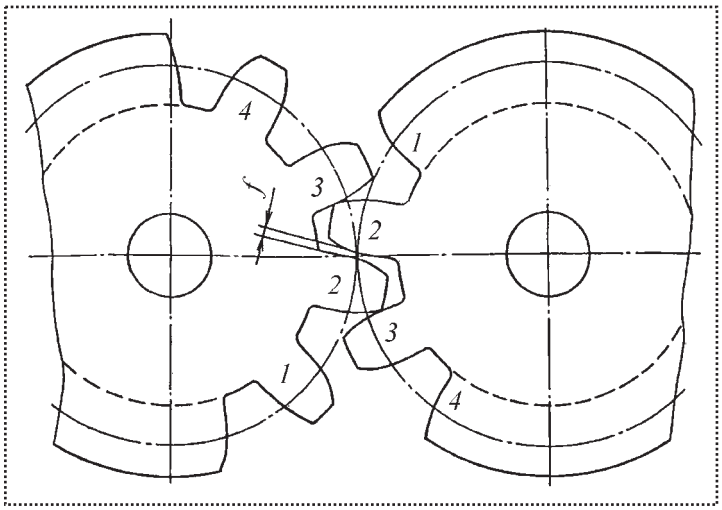


Рис. 2. Схема нумерации зубьев шестерни и зубчатого колеса

лям. Давление масла 5 кгс/см^2 (0,6 МПа), производительность насоса 8 л/мин при частоте вращения 1450 мин$^{-1}$. На зубья шестерни и зубчатого колеса наносят метки или набивают их номера (рис. 2). В данном случае их 12. Допуск на боковой зазор составляет 0,45 мм, на утечку масла 4,49 л/мин.

Насос без крышки устанавливают горизонтально в устройство, аналогичное изображенному на рис. 1. Подводят фиксатор к впадине зуба зубчатого колеса. Включают систему автоматического управления. Механизм захвата автоматически захватывает шестерню. Осуществляются автоматически все действия, необходимые для измерения бокового зазора во всех возможных вариантах сопряжений зубьев, в описанной выше последовательности. Повторяют *12* циклов *12* раз.

Вычислительный блок САУ находит, что наиболее эффективными вариантами соединения зубьев являются № 1 и № 4. Они обеспечивают наименьшую величину верхнего предельного отклонения бокового зазора (0,107 мм), что меньше допуска (0,45 мм) более чем в 4 раза. Другие варианты соединений тоже обеспечивают допустимый боковой зазор, но варианты №1 и № 4 обеспечивают наименьшую утечку масла. Время на сборку в данном случае в 27 раз меньше по сравнению с ручной сборкой.

Экономическая эффективность описанного способа управления процессом сборки зубчатых передач может быть определена как разность экономии от повышения производительности процесса сборки и надежности машин, в которых установлена зубчатая передача, и дополнительных расходов на сборку в связи с ее автоматизацией.

Описанные элементы механической части САУ могут быть с успехом применены и при сборке других более сложных зубчатых передач с параллельными осями. Механическая часть будет отличаться лишь размерами захватных устройств. Система управления может содержать большое количество датчиков, чувствительных и передающих элементов, более громоздкое вычислительное устройство. Предложенный способ управления с соответствующими изменениями может быть использован и для зубчатых передач с перпендикулярными осями.

Библиографический список

1. **Прилуцкий В.А.** Повышение точности сборки зубчатых передач/В.А. Прилуцкий, И.К. Рыльцев//Вестник машиностроения. 1998. №10. С.19–23.

2. **Патент RU 2295 652 C1** Прилуцкий В.А., Прилуцкая С.В., Вагнер С.Ю. Способ управления процессом сборки зубчатых передач и устройство для его осуществления.

УДК 621.9.112.89

***Б.Ф. Безъязычный**, д-р техн. наук, профессор,*
зав. кафедрой "Технология авиационных двигателей и общего машиностроения",
***В.В. Непомилуев**, д-р техн. наук, профессор кафедры "Организация производства*
и управление качеством" (Рыбинская авиационная государственная академия
им. П. А. Соловьева, 152934, Рыбинск, Ярославская обл., ул. Пушкина, 53)
E-mail: root@rgata.ru, vvvvnn@yandex.ru

Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления

Изложены наиболее актуальные, по мнению авторов, проблемы сборочного производства: высокая трудоемкость сборки; изменчивость достигнутого качества при сборке вследствие эксплуатации изделия; плохая повторяемость результатов сборки; необъективность оценки достигнутого при сборке качества. С целью устранения некоторых проблем предлагается использовать методы виртуальной сборки с применением компьютерной техники.

According to the authors the main problems of assembly are: high laboriousness of assembly; variability of reached assembly quality resulting from the use of a product; low repeatability of assembly results; biased evaluation of quality reached during assembly. In order to eliminate some problems, the use of computer – assisted virtual assembly methods has been proposed.

Ключевые слова: проблемы сборки, качество, автоматизация сборки, виртуальная сборка.

Key words: problems of assembling, quality, assembly automation, virtual assembly.

Сборка – завершающий, трудоемкий и дорогостоящий технологический процесс, во многом определяющий эксплуатационные качества и себестоимость изготовления изделия. Научно-технический прогресс в машиностроении сопровождается постоянным усложнением конструкций, повышением требований к качеству выпускаемых изделий. Однако создание новых изделий в значительной мере сдерживается имеющимся уровнем технологии их изготовления, в том числе и технологии сборки. Среди многочисленных сложных проблем можно выделить следующие.

1. Высокая трудоемкость сборки вследствие низкого уровня ее автоматизации

Надежность изделия, его важнейшие эксплуатационные параметры в значительной степени определяются уровнем технологии и качеством выполнения процессов сборки. Процесс сборки отличается сложностью. Это объясняется тем, что в отличие от предшествующих технологических процессов, элементами которых являются детали и заготовки, объекты сборки – более сложные специфицированные изделия; возрастает число выходных параметров, подлежащих контролю. Относительная трудоемкость сборочных работ за последние 40–50 лет неуклонно растет в связи с тем, что технологии получения исходных заготовок и их механической обработки совершенствуются значительно более быстрыми темпами, чем технология сборки изделий.

Процесс образования сборочного соединения требует выполнения достаточно сложных по траектории перемещений с высокой точностью. В том случае, когда сборка осуществляется вручную, необходимая точность перемещения обеспечивается наличием визуальной и тактильной обратной связи между сборщиком и объектами сборки, что позволяет оперативно производить соответствующую коррекцию. При автоматизации сборки, как правило, не удается создать приемлемые по стоимости и гибкости переналадки надежные средства автоматизации, обладающие указанными свойствами.

В связи с этим автоматические сборочные устройства имеют достаточно специфические области использования:

– массовое и крупносерийное производство, где возможно применение труднопереналаживаемых «жестких» сборочных автоматов;

– сборка изделий или отдельных узлов, где не требуется выполнения описанных выше сложных перемещений;

– процессы сборки, совершаемые в опасных для человека условиях, когда экономические факторы не являются доминирующими.

Прогресс в данном направлении связан с постоянным, но эволюционным развитием промышленных роботов, устройств для ориентации и систем управления ими. Несмотря на имеющиеся успехи, сборка все еще остается наиболее трудоемким и наименее автоматизированным процессом при изготовлении большинства машин. Особенно велика трудоемкость сборки изделий, требуемые показатели качества которых достигаются методами компенсации, т.е. за счет подбора деталей, выполнения пригоночных или регулировочных работ. Уровень автоматизации сборочных процессов даже в общем машиностроении не превышает 10%, а в авиационном двигателестроении он вообще близок к нулю.

2. Непредсказуемая изменчивость при эксплуатации машины достигнутого при ее сборке качества

Эта проблема вызывается большим количеством причин, среди которых можно выделить следующие.

Все детали и сборочные единицы, входящие в состав собранной машины, обладают наследственными свойствами, заложенными при ее изготовлении и проявляющимися постепенно в течение длительного периода времени. В результате непрерывно и чаще всего непредсказуемо меняются и свойства деталей, сборочных единиц и самой машины. Такие изменения происходят всегда, и хотя во многих случаях они незаметны, для высокоточных машин их нельзя не учитывать.

Известны случаи, когда детали, попадающие на сборку после значительно более долгого, чем обычно, пролеживания на складе, бракуются входным контролем. Так, распределительные валы дизельного двигателя ЯМЗ-240, по тем или иным причинам попадавшие на сборку после длительного хранения, имели величины радиальных биений шеек под подшипники скольжения до 0,5 мм, что в 10 раз больше допуска (0,05 мм), и браковались на сборке. Детали же, для которых период пролеживания не превышал нескольких дней, находились в пределах допусков. И те, и другие были изготовлены на одном и том же оборудовании и приняты контролерами. Причиной брака оказались изменения формы деталей из-за релаксации остаточных напряжений в них. Между тем детали, попавшие на сборку сразу же после их изготовления, все равно деформируются или стремятся к этому, но уже после установки их в изделие, что приводит к дополнительному неучтенному нагружению опор вала и их повышенному изнашиванию в процессе эксплуатации. В результате уже через очень небольшое время реальное положение значительно отличается от того, что было спроектировано конструктором и получено при сборке двигателя.

Для уменьшения влияния технологической наследственности на качество машины могут быть использованы следующие меры:

- сведение к минимуму нежелательных наследственных свойств деталей;
- обеспечение благоприятного направления изменения характеристик деталей вследствие проявления их наследственных свойств;
- управление происходящими изменениями в процессе эксплуатации машины;
- разработка конструкций машин, нечувствительных к изменениям.

В течение жизненного цикла собранного изделия практически всегда на него воздействуют различные случайные факторы, в результате чего могут изменяться его свойства. Например, геометрическая точность металлорежущего станка существенно и непредсказуемым образом меняется при его установке на жестком фундаменте. Для уменьшения влияния случайных факторов необходимо либо всемерно изолировать изделие от их воздействия, либо постоянно контролировать его параметры и своевременно принимать меры по компенсации случайных воздействий.

В процессе функционирования собранной машины вследствие появления эксплуатационных нагрузок происходят ее деформации. Как правило, они носят сложный характер и далеко не всегда даже оцениваются. Причинами таких деформаций могут быть, например, интенсив-

ный фреттинг-износ контактирующих поверхностей торцов в местах слишком малой фактической площади их контакта, микроперемещения деталей из-за уменьшения сил трения между ними, а также из-за изменения зазоров и натягов в посадках, неравномерные контактные пластические деформации в стыках деталей. Наличие таких изменений подтверждается тем, что в некоторых случаях после испытания собранного изделия заметно изменяются его размеры, относительное положение поверхностей, уравновешенность. Величины этих изменений могут быть настолько велики, что это приводит к необходимости дополнительных пригоночных операций.

Работоспособность любого изделия определяется характером взаимодействия исполнительных поверхностей его деталей, которое принято формализованно отражать в виде взаимосвязей размерных параметров или размерных цепей. Проектирование технологии сборки основано на размерном анализе этих цепей, который базируется на основных положениях существующей теории размерных цепей, которую можно считать классической. Основные положения классической теории размерных цепей основаны на целом ряде серьезных допущений:

– геометрические параметры составляющих звеньев размерных цепей остаются неизменными на всех этапах жизненного цикла машины. Таким образом, детали рассматриваются как абсолютно жесткие тела, не учитываются их силовые и температурные деформации, изнашивание сопряженных поверхностей и многие другие разнообразные явления, неизбежно происходящие при работе машины;

– не учитывается динамический характер работы большинства машин – мертвый ход, знакопеременные упругие деформации, возникающие при работе в условиях знакопеременных нагрузок;

– исключается взаимовлияние погрешностей составляющих звеньев и их воздействие на закон распределения погрешностей замыкающего звена;

– на величину замыкающего звена размерной цепи влияют только те размеры, которые непосредственно входят в нее;

– в уравнение размерной цепи входит только один размер каждой детали;

– не учитываются специфические особенности каждой конкретной детали, например реальная топография ее сопрягаемых поверхностей;

– не учитывается возможность изменения положения деталей друг относительно друга при сборке (из-за наложения силового замыкания) или эксплуатации (из-за действия эксплуатационных нагрузок).

Поскольку классическая теория размерных цепей использует несколько серьезных допущений, то возникает погрешность, которую на практике стремятся свести к минимуму завышением жесткости и точности деталей, эмпирическим подбором оптимальных размеров деталей при доводке машины, использованием при ее сборке методов индивидуального подбора, регулировки и пригонки.

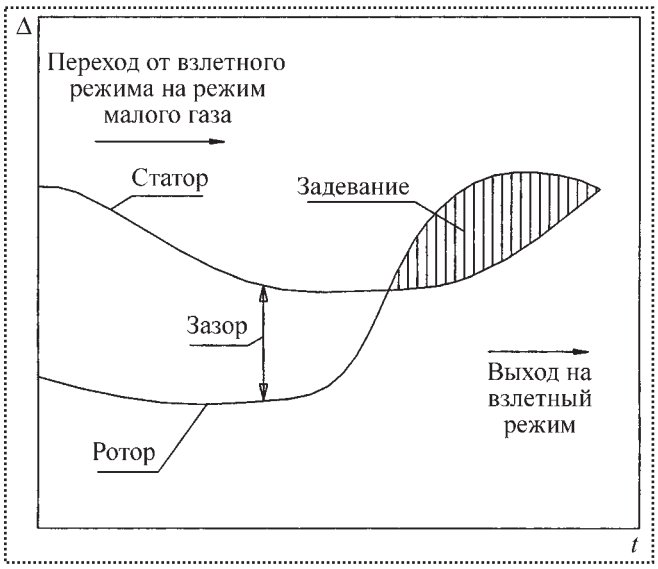
Обычно еще при конструировании изделия предусматривается, чтобы эти погрешности не превышали определенных величин и не влияли заметно на выполнение машиной ее служебного назначения. Но, тем не менее, многие параметры сопряжений деталей в работающей машине заметно отличаются от определяемых при ее проектировании и сборке и во многих случаях изменения размеров составляющих звеньев могут быть столь существенными, что допущения классической теории размерных цепей становятся совершенно неприемлемыми. Поэтому та точность, которая предусматривается чертежом и техническими требованиями и достигается в процессе сборки машины, зачастую является в значительной мере условной.

Эта проблема особенно актуальна для авиационного двигателестроения, где большинство деталей являются нежесткими, тяжелонагруженными и работают при изменении температур в широких пределах. Отсутствие надежных методик расчета нежестких размерных цепей приводит к значительному удлинению и удорожанию этапов конструктивной доводки и технологической подготовки серийного производства спроектированного авиационного двигателя.

Под нежесткими размерными цепями понимаются такие, в которых под действием различных внутренних и внешних факторов происходят значительные обратимые и необратимые из-

менения размеров составляющих звеньев, что вызывает существенное изменение величины замыкающего звена. Вследствие этого размеры собранного узла оказываются зависящими от большого количества различных факторов: действительных размеров деталей – составляющих звеньев размерной цепи, состояния поверхностного слоя, шероховатости, волнистости и макрогеометрических отклонений контактирующих поверхностей, упругих и пластических свойств материалов, величин сил, прикладываемых к деталям при сборке, отклонений размеров, непосредственно не входящих в размерную цепь, но влияющих на жесткость деталей и, таким образом, на силы и деформации в узле при его сборке и эксплуатации.

Примером нежесткой размерной цепи в авиационном газотурбинном двигателе является цепь размеров вал – диск – лопатка – зазор – корпус – опора. Замыкающее звено этой цепи – радиальный зазор, а все составляющие звенья нежесткие и легко деформируются, изменяя величину замыкающего звена. При этом заметно ухудшается топливная экономичность двигателя (при увеличении зазора) или нарушается безопасность полета самолета (в случае уменьшения зазора до нуля и касания ротора о статор). Сложность и актуальность этой проблемы подтверждают данные рисунка, на котором представлены результаты экспериментального измерения радиального зазора между лопатками и корпусом турбины высокого давления серийного авиадвигателя CF6-50 американской фирмы General Electric (такие двигатели устанавливают, например, на пассажирских самолетах Douglas DC-10-30) в процессе приемистости при повторном запуске прогретого двигателя.



Изменение во времени радиального зазора Δ между ротором и статором двигателя CF6-50

Анализ этих данных позволяет сделать следующие выводы:

- даже у широко распространенного серийного авиадвигателя CF6-50 имеются такие режимы работы, на которых происходит очень опасное и совершенно недопустимое явление – касание ротора о статор;
- радиальный зазор между ротором и статором этого двигателя в процессе работы изменяется настолько, что его величина, получаемая и контролируемая при сборке, достаточно условна и не может в полной мере характеризовать действительную картину;
- классическая теория размерных цепей в данном случае совершенно неадекватна и не может быть использована для расчета величины радиального зазора и анализа его изменения при работе двигателя.

Таким образом, можно сделать следующий общий вывод: повышение производительности и качества сборки роторов газотрубных двигателей в современных условиях может быть достигнуто путем создания управляемого по качеству процесса сборки на основе использования достоверных аналитических методов расчета реальных нежестких размерных цепей, а также разработки новых методов обеспечения требуемого качества сборки.

3. Плохая повторяемость результатов сборки

В процессе сборки происходит образование сборочных соединений, сопровождающееся сложными контактными явлениями. На характер протекания и результат этих процессов – сборочные деформации – влияют параметры качества контактирующих поверхностей, на многие из которых задаются допуски, а некоторые не контролируются вообще. Достаточно высокая степень непредсказуемости результата сборки существует даже в том случае, если до сборки известны действительные размеры всех деталей.

Поэтому в большинстве случаев выходные параметры процесса сборки достаточно надежно могут быть проконтролированы только лишь на полностью собранном узле или даже готовом изделии в процессе его испытания, поскольку существующая теория размерных цепей не позволяет адекватно описывать и исследовать размерные связи в собираемой или работающей машине.

Так, если балансировка гибкого ротора газотурбинного двигателя производится не на рабочих частотах, то полная характеристика достигнутого качества его уравновешенности, как правило, выявляется только лишь при испытании полностью собранного двигателя, когда уравновесить его (в случае появления недопустимой вибрации) балансировочными методами зачастую уже невозможно.

Для устранения недопустимого дисбаланса в этом случае необходимо разобрать двигатель и ротор, развернуть его детали друг относительно друга, снова собрать и отбалансировать сначала ротор, а затем и весь двигатель. Причем осуществление всех этих мероприятий отнюдь не гарантирует, что при работе перебранного таким образом двигателя снова не возникнут вибрации. Кроме того, повторные сборки чрезвычайно трудоемки и снижают качество собираемого изделия, поскольку после осуществления разворота деталей для компенсации погрешностей необходимо каждый раз заново с высокой точностью обрабатывать по месту отверстия под призонные болты (они соединяют детали ротора), увеличивая их диаметр и заменяя сами болты.

Для решения данной проблемы необходимы дополнительные исследования в целях разработки методов количественной оценки контактных явлений с учетом конкретных особенностей собираемых деталей и контроль всех существенно влияющих на эти явления факторов сборки.

4. Необъективность оценки достигнутого при сборке качества

При решении любой технической проблемы необходимо обеспечить выполнение трех взаимосвязанных задач:

– конструкторской,
– технологической,
– метрологической.

Кроме того, что сами по себе эти задачи сложны, их необходимо решать с учетом технико-экономических ограничений. Как правило, решение в том числе и метрологической задачи представляет собой компромисс, поскольку во многих случаях контроль непосредственно требуемых от изделия эксплуатационных свойств либо затруднителен, либо вообще невозможен.

В связи с этим часто контролируют параметры, как-либо связанные с рассматриваемым свойством, но не являющиеся им. Более того, используемые для оценки параметры неоднозначны, не характеризуют его полностью и допускают различные неравноценные варианты.

Решением рассматриваемой проблемы может быть использование технологии виртуальной сборки. Виртуальную сборку можно представить как процесс, происходящий внутри компьютера, но включающий в себя все основные существенные признаки и явления физически выполняемой сборки реально существующего изделия. В результате создается виртуальное изделие – адекватная цифровая математическая модель (или набор математических моделей) собранного изделия, учитывающая все наиболее существенные свойства и процессы, характерные для данного конкретного экземпляра какого-либо реального изделия.

Виртуальность изделия заключается в программном моделировании необходимых для его функционирования операций. В самом простейшем случае это виртуальное изделие может быть предназначено, например, для определения выходных геометрических (распределение эксцентриситетов) или физических (распределение дисбалансов) характеристик сборки соответствующего реального изделия в данном конкретном варианте комплектации его деталей. Однако наличие в компьютере виртуального изделия позволяет ставить, быстро и эффективно решать и значительно более сложные и интересные в практическом или теоретическом отношении задачи.

Так, с полученным виртуальным изделием в компьютерной среде виртуальной реальности в принципе можно очень быстро и с небольшими затратами производить те же самые действия, что и с реальным, физически существующим изделием, например, виртуальные балансировку,

испытание, эксплуатацию. А это уже позволяет оценивать качество сборки изделия при данном конкретном варианте его комплектации по тем критериям, которые однозначно характеризуют его, но не могут быть обеспечены при использовании традиционной технологии сборки. Тем самым можно избежать потерь информации, что приводит к экономии материальных и энергетических ресурсов.

Технология виртуальной сборки может быть и составной частью виртуального производства изделия, начинающегося виртуальным изготовлением деталей и завершающегося виртуальными испытанием и эксплуатацией изделия на различных режимах. Такая технология дает возможность:

♦ оценивать качество сборки изделия не только с помощью традиционных показателей, но и использовать гораздо более надежные и информативные эксплуатационные показатели, тесно связанные со служебным назначением изделия и не обеспечивающиеся при обычно используемой технологии сборки;

♦ оценивать качество самой конструкции изделия, исследуя ее поведение на различных режимах с учетом специфических погрешностей, возникающих на всех этапах ее изготовления;

♦ обоснованно формулировать требования к качеству изготовления деталей.

Использование компьютера при этом позволяет очень быстро рассмотреть множество вариантов комплектации, конструктивного исполнения или качества изготовления собираемого изделия и выбрать лучший из них, причем по критериям, напрямую связанным с эксплуатационным назначением изделия, например, по величине дисбаланса ротора на рабочих скоростях. Иными словами, использование технологии виртуальной реальности дает возможность "изготовить" детали, "собрать" из них изделие, определить его необходимые геометрические и физические параметры, провести испытание и уже по его результатам оценить качество данного варианта изготовления машины.

Виртуальность этого процесса и возможность полного осуществления всех его этапов внутри ЭВМ позволяет выполнять все перечисленные выше операции чрезвычайно быстро и с небольшими затратами, несоизмеримыми с затратами на физически выполняемую сборку сложных изделий. Таким образом, виртуальное производство становится эффективным средством конструкторско-технологической подготовки реального серийного производства нового изделия.

5. Сложность обеспечения требований к качеству

Современное машиностроительное производство характеризуется жесткими и постоянно возрастающими требованиями к качеству изготовления машин. Их обеспечение существующими методами требует в ряде случаев чрезмерных затрат, поскольку требования к качеству деталей находятся на грани максимально достижимых в серийном производстве. Например, при изготовлении ряда узлов авиационных двигателей и других сложных машин широко используются крайне нежелательные в серийном производстве методы пригонки, поскольку современное оборудование не позволяет изготавливать детали с таким высоким качеством, чтобы можно было использовать методы взаимозаменяемости.

Среди предъявляемых к качеству сборки требований традиционно доминируют требования к точности (размеров, относительного положения поверхностей, траекторий перемещения деталей и т.д.).

Существующие технологические методы постоянно совершенствуются, но этот процесс протекает достаточно медленно, эволюционно. В связи с этим необходимы новые подходы к решению проблемы повышения качества.

Технологический процесс сборки заключается в соединении деталей, входящих в изделие; он является способом преобразования множества деталей в готовое изделие. Процесс сборки можно представить как процесс формирования замыкающего звена размерной цепи, при этом по определенным законам происходит суммирование погрешностей собираемых деталей. Такой подход позволяет использовать основные методы и понятия теории размерного анализа при рассмотрении вопросов, связанных с возможностями повышения качества сборки.

Как известно, качество сборки традиционно обеспечивают методами взаимозаменяемости (полной, неполной или групповой) или компенсации (регулирования и пригонки). При исполь-

зовании традиционных методов сборщик наугад берет собираемые детали, а удовлетворительность или неудовлетворительность полученного в результате параметра качества оценивается уже после сборки.

Таким образом, сам процесс суммирования погрешностей деталей при образовании сборочного соединения неуправляем и для обеспечения высокого качества сборки изделия необходимо либо уменьшать допуски на изготовление его деталей (при использовании метода полной взаимозаменяемости), либо разобрать полученное соединение и повторить попытку сборки (метод неполной взаимозаменяемости), либо осуществлять дополнительные мероприятия (метод групповой взаимозаменяемости), либо производить компенсацию.

Этого недостатка лишен метод индивидуального подбора деталей, основанный на рассмотрении различных возможных вариантов соединения и выборе лучшего из них. Однако непосредственное применение сборщиком такого способа при изготовлении реального изделия, когда количество возможных вариантов соединения деталей может превышать десятки миллионов, невозможно. Выход – в автоматизации процесса индивидуального подбора деталей с помощью ЭВМ и превращении его в компьютерную технологию. В этом случае перед осуществлением реального процесса сборки с помощью компьютера производится расчет возможных вариантов и выбор наилучших из них.

В результате сборщик получает указания, какие именно конкретные детали из имеющихся в его распоряжении необходимо соединить в данном комплекте. Таким образом, управляемость процесса в этом случае обеспечивается введением выполняемой на компьютере дополнительной операции комплектации перед сборкой.

Предварительное упорядоченное комплектование собираемых деталей в настоящее время имеет довольно ограниченное применение в машиностроительном производстве и чаще всего ограничивается использованием сборки по методу групповой взаимозаменяемости. Однако сборка по методу групповой взаимозаменяемости является лишь относительно простым случаем применения идеи предварительного упорядоченного комплектования деталей на сборку. Его можно использовать значительно шире, что будет способствовать существенному повышению технико-экономических показателей сборочных процессов.

Недостатки этой технологии связаны как с некоторыми недостатками самого метода индивидуального подбора (потеря собранными изделиями свойства взаимозаменяемости их деталей при ремонте), так и с их специфичностью (повышение трудоемкости контроля деталей и комплектации). Однако оба эти недостатка не слишком большие.

Так, требование сохранения взаимозаменяемости деталей далеко не всегда существенно для многих изделий, которые могут быть собраны с использованием метода индивидуального подбора. С одной стороны, многие детали не заменяются в процессе ремонта машины, а служат весь срок ее эксплуатации. С другой стороны, большинство машин при эксплуатации претерпевают столь существенные изменения, что при ремонте их с заменой наиболее точных деталей новые детали все равно приходится подбирать, пригонять или регулировать по месту, даже если при изготовлении машины использовали принцип полной взаимозаменяемости.

Применение такой технологии повышает трудоемкость операции сборки, однако общая трудоемкость изготовления машины может быть существенно снижена за счет отсутствия необходимости проведения дополнительных мероприятий для достижения требуемой точности. Кроме того, процесс измерения деталей и введения полученных размеров в базу данных легко автоматизировать с помощью достаточно простых технических средств.

Для практического использования этой технологии не потребуется больших капитальных затрат, так как все изменения будут касаться в основном только организационной стороны процесса сборки, а необходимости в дорогостоящем контрольном или сборочном оборудовании нет.

Как показывают исследования, использование метода индивидуального подбора деталей на компьютере позволяет в несколько раз уменьшить погрешность замыкающего звена размерной цепи (или, что то же самое, повысить качество изделия), не завышая требований к деталям

и не допуская риска получения дефектного изделия при физическом осуществлении процесса сборки. Так, при сборке простейшей размерной цепи, включающей в себя два составляющих и одно замыкающее звено, погрешность замыкающего звена может быть уменьшена в 10–12 раз по сравнению с методом полной взаимозаменяемости даже в случае самых неблагоприятных сочетаний законов распределения размеров деталей.

Возможности метода индивидуального подбора деталей значительно возрастают при увеличении количества подбираемых деталей. Поэтому использование технологии виртуальной сборки, основанной на методе индивидуального подбора деталей, наиболее эффективно при изготовлении высокоточных машин, содержащих многозвенные размерные цепи. Достигаемая точность замыкающего звена повышается, если производится подбор всех имеющихся деталей, т.е. оптимизация сборочных комплектов.

Использование компьютера при этом позволяет очень быстро рассмотреть множество вариантов комплектации собираемого изделия и выбрать лучший из них, причем по критериям, напрямую связанным с эксплуатационными свойствами изделия, например, величинам и распределению дисбалансов ротора на рабочих скоростях. Виртуальность процесса позволяет выполнять эти операции очень быстро и с небольшими затратами, несоизмеримыми с затратами на физически выполняемую сборку.

Таковы, на взгляд авторов данной работы, наиболее существенные проблемы сборочного производства и пути их решения.

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ДВОЙНЫХ И ТРОЙНЫХ СИСТЕМ. ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ В СПЛАВАХ:

учебное пособие

О.Е. Осинцев

М.: Машиностроение, 2009. 352 с.: ил.

Цена 550 р. с НДС

Рассмотрены двойные и тройные диаграммы состояния металлических систем. Изложена методика построения изотермических и политермических разрезов и анализа фазовых превращений в различных сплавах, приведена их структура. Рассмотрены теоретические основы термодинамики в ее приложении к изучению фазовых равновесий. С использованием метода геометрической термодинамики проведен анализ двойных диаграмм состояния. При анализе трехкомпонентных диаграмм состояния с двойными и тройными промежуточными фазами с несколькими четырехфазными нонвариантными реакциями использованы структурные схемы фазовых равновесий.

Для студентов машиностроительных и металлургических вузов, специализирующихся в области материаловедения, термической обработки, порошковых, композиционных материалов и защитных покрытий и других смежных специальностей. Может быть полезно аспирантам и широкому кругу научных работников в области металловедения.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в ООО "Издательство Машиностроение" в отдел продаж, маркетинга и рекламы: по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.757

Б.Ю. Житников, *д-р техн. наук (ВЮИ, г. Владимир);*
Д.С. Воркуев, *канд. техн. наук (ОАО «Завод им. В.А. Дегтярева», г. Ковров)*
e-mail: kgta_tms@mail.ru

Разработка кинематической схемы многошпиндельного гайковерта на основе муфты предельного момента, дифференциальных механизмов и механизмов свободного хода для четного числа шпинделей

На основе структурной схемы управления процессом сборки групповых резьбовых соединений разработана кинематическая схема многошпиндельного завинчивающего устройства с пассивными обратными связями, обеспечивающая затяжку соединений с погрешностью осевых сил не более чем 2,5 % номинального значения.

On the basis of the structural diagram of controlling the process of cluster screw joints assembly the kinematics of the multi-spindle screwing unit with passive feedback has been developed, providing the junction tightening with the axial force error not exceeding 2.5 % of the nominal value.

Ключевые слова: кинематическая схема, многошпиндельный гайковерт, муфта предельного момента, дифференциальный механизм, механизм свободного хода, резьбовые соединения, обратные связи.

Key words: kinematics, multi-spindle nut-setter, torque limiting clutch, differential, free-wheeling mechanism, screw joints, feedback.

В настоящее время имеются конструкции многошпиндельных гайковертов нового класса [1] для кратного числа шпинделей (*2*, *4*, *8*, *16*, *32*, ...), которые обеспечивают точность осевых сил затяжки в групповых резьбовых соединениях с погрешностью, не превышающей 2,5 % номинального значения осевой силы затяжки.

При переходе от кратного числа шпинделей к четному погрешности осевых сил затяжки возрастают до 7 %.

Обоснуем кинематическую схему многошпиндельного гайковерта для четного числа шпинделей, в котором погрешности осевых сил затяжки не превысят 2,5 %.

Предварительно составим структурную схему управления процессом одновременной автоматизированной сборки четного числа резьбовых соединений.

Для обеспечения высокого качества сборки и точности осевых сил затяжки резьбовых соединений многошпиндельные гайковерты должны соответствовать следующим требованиям:

– согласно [1] гайковерт должен иметь две ветви вращения – быстроходную, но маломоментную и тихоходную, но высокомоментную;

– при завинчивании и предварительной затяжке должна работать быстроходная ветвь вращения;

– при достижении момента предварительной затяжки, который составляет не более одной десятой момента окончательной затяжки, быстроходная ветвь вращения должна отключаться;

– для обеспечения практически одновременного включения вращения всех шпинделей в момент начала окончательной затяжки резьбовых соединений необходимо предусмотреть режим ожидания, т.е. остановки вращения тех шпинделей, на которых достигнут требуемый момент, а также обеспечить значительную разницу скоростей вращения быстроходной и тихоходной ветвей вращения;

– окончательная затяжка, т.е. одновременный поворот всех резьбовых деталей на требуемый угол, должна производиться синхронно;

– при достижении требуемого значения угла затяжки привод должен отключаться;

– переключение шпинделей с быстроходной ветви вращения на тихоходную должно происходить автоматически.

Многошпиндельный гайковерт должен работать следующим образом. Задающее устройство устанавливает требуемые частоту и крутящий момент привода. Вращение подается по двум направлениям – по быстроходной, но маломоментной ветви и тихоходной, но высокомоментной. Предельное значение маломоментной ветви вращения задает специальное устройство. Быстроходное вращение разделяется по нескольким каналам, крутящие моменты в которых регулируются специальными устройствами. При достижении требуемого момента предварительной затяжки задающее устройство отключает вращение по быстроходной ветви и задает новое значение момента привода. Через устройство разделения вращений движение передается по тихоходным, но высокомоментным ветвям по нескольким каналам. Происходит синхронный поворот всех шпинделей на требуемый угол окончательной затяжки с последующим отключением гайковерта.

С учетом указанных требований на рис. 1 представлена структурная схема управления шестишпиндельным гайковертом.

От активной системы управления завинчиванием групповых резьбовых соединений, основанной на задающих устройствах и датчиках обратной связи, которые довольно сложно устанавливать на каждом шпинделе, перейдем к пассивной системе управления.

Функцию задающего устройства момента предварительной затяжки, передаваемого по быстроходным, но маломоментным каналам вращения, может выполнять муфта предельного момента – МПМ.

Разделение вращений быстроходной, но маломоментной ветви по каналам управления $УД_1$ может выполнить зубчатая передача, представляющая собой центральную шестерню, взаимодействующую с несколькими зубчатыми колесами.

Функцию разделения $УД_2$ по двум каналам вращения с обеспечением взаимосвязи по моментам сопротивления на шпинделях могут обеспечить дифференциальные механизмы $Д_1$, $Д_2$, $Д_3$.

Разделение вращений тихоходной, но высокомоментной ветви вращения по каналам управления УД по аналогии с $УД_1$ может выполнить зубчатая передача, состоящая из центральной шестерни и зубчатых колес.

Функцию автоматического переключения с быстроходной на тихоходную ветвь вращения может обеспечить механизм свободного хода (МСХ) храпового типа, собачки которого расположены на ведущих обоймах, а храповые колеса – на ведомых. При работе быстроходной ветви вращения собачка проскальзывает по храповому колесу, не передавая вращения. При остановке быстроходной ветви собачка войдет во взаимодействие с храповым колесом и начнет передавать медленное вращение.

Отсчет требуемого угла поворота шпинделей при окончательной затяжке резьбовых соединений можно обеспечить за счет установки датчика импульсов, взаимодействующего с подвижной полумуфтой муфты предельного момента.

Кинематическая схема четырехшпиндельного гайковерта на основе муфты предельного момента, дифференциальных механизмов и механизмов свободного хода представлена на рис. 2.

Гайковерт имеет две ветви вращения – быстроходную, но маломоментную и тихоходную, но высокомоментную.

По быстроходной ветви вращение передается от электродвигателя *1* через зубчатую передачу *66*, *2* на муфту предельного момента *5* и далее через зубчатую передачу *21*, *46* на центральную шестерню *19*. Происходит разделение вращений по двум кинематическим цепям.

По первой – от шестерни *19* к колесу *18* на ось вращения *12* дифференциала, где движение вновь разделяется на два. Первое вращение через ось *12* дифференциала, которая жестко связана с осью *14* сателлитов *13*, передается на сдвоенную шестерню *11*, взаимодействующую с колесом *10*, и далее через зубчатые передачи *23*, *22* и *24*, *25* на шпиндель *26* к патрону для удержания резьбовых деталей *27*. Второе вращение от оси *14* на сателлиты *13* передается сдвоенной шестерне *16*, взаимодействующей с колесом *17*, и далее через зубчатые передачи *30*, *28* и *29*, *33* – на шпиндель *31* и к патрону *32*.

По второй – от центральной шестерни *19* к колесу *48* на ось дифференциала *54* и по аналогии с вышеописанным – по кинематическим цепям взаимодействия элементов гайковерта к шпинделям *34*, *41* и патронам *35*, *40*.

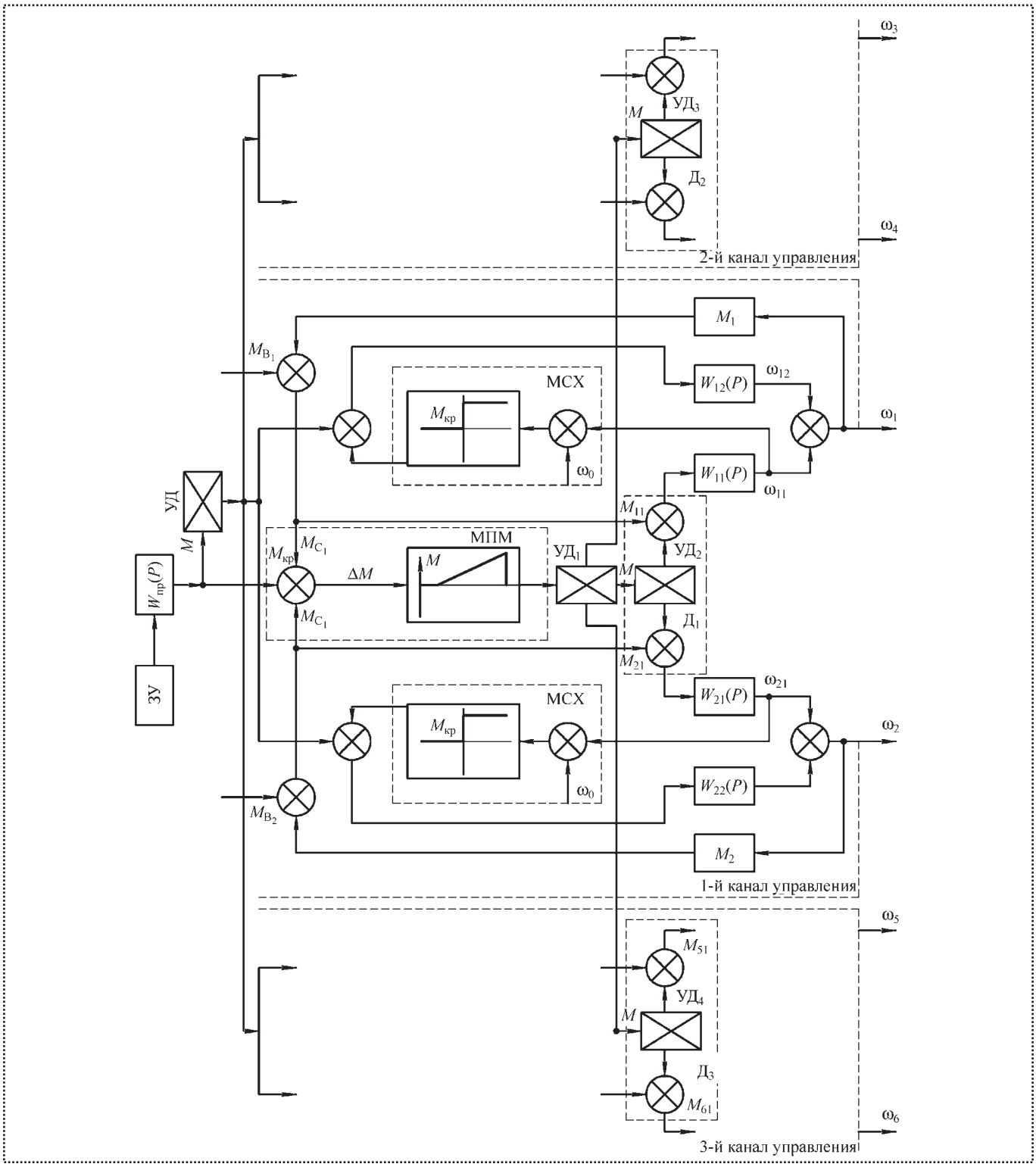


Рис. 1. Структурная схема управления шестишпиндельным гайковертом:
ЗУ – задающее устройство момента привода;
$W_{пр}(P)$, $W_i(P)$ – передаточные функции соответственно привода по моменту и элементов управления моментами;
M_i – возмущающие моменты;
☒ – устройства разделения движений с заданными крутящими моментами $M_{кр}$;
⊗ – устройства сравнения моментов или угловых скоростей ω;
остальные обозначения – в тексте

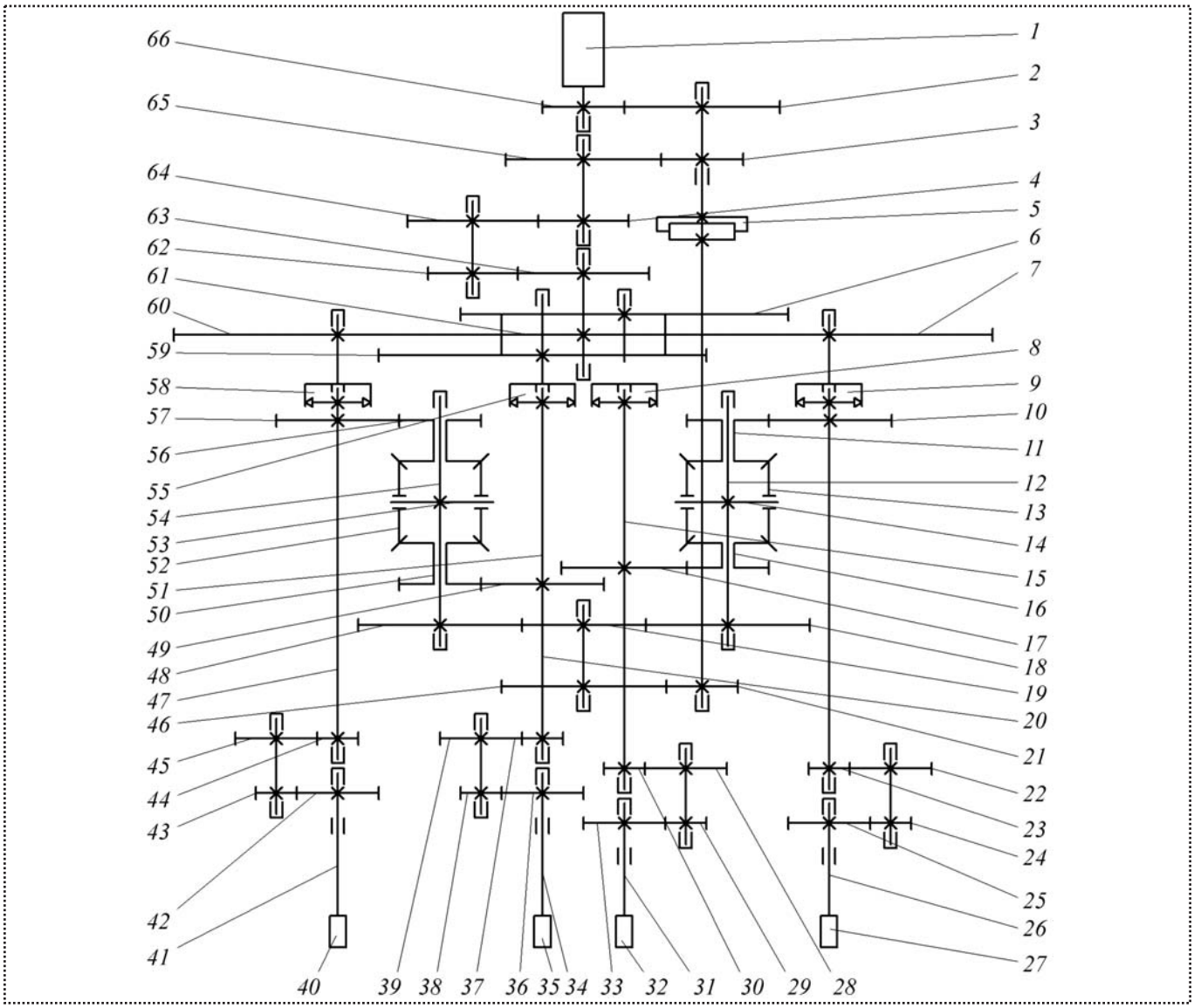


Рис. 2. Кинематическая схема четырехшпиндельного гайковерта на основе муфты предельного момента, дифференциальных механизмов и механизмов свободного хода

По тихоходной, но высокомоментной ветви вращение от электродвигателя *1* через зубчатые передачи *66*, *2*; *3*, *65*; *4*, *64*; *62*, *63* передается на центральную шестерню *61* разделения вращений по кинематическим цепям взаимодействия к шпинделям.

К шпинделю *26* от центральной шестерни *61* вращение передается через зубчатое колесо *7*, механизм свободного хода *9* и далее через зубчатые передачи *23*, *22* и *24*, *25*.

По аналогии движение от центральной шестерни *61* передается к шпинделям *31*, *34*, *41*.

На рис. 2 поз. *6*, *36–39*, *42–45*, *49*, *57*, *59* и *60* – зубчатые колеса; *15*, *20* и *47* – валы для передачи вращения шпинделям соответственно *31*, *34* и *41*; *50*, *56* – сдвоенные шестерни; *53* – водило дифференциала.

Многошпиндельный гайковерт работает следующим образом. Включается электродвигатель и по быстроходным кинематическим целям вращение передается всем шпинделям и одновременно – по тихоходной ветви до механизмов свободного хода *9*, *8*, *55*, *58*. Учитывая, что собачки механизмов свободного хода расположены на ведущих обоймах механизмов, а храповые колеса – на ведомых, а также меньшую скорость вращения ведущих обойм с собачками по отно-

шению к ведомым, которые вращаются за счет быстроходных кинематических цепей, от собачек вращение к храповым колесам не передается (происходит проскальзывание).

Как только сработает муфта предельного момента *5*, обеспечив требуемые моменты предварительной затяжки резьбовых соединений, вращение по быстроходным кинематическим цепям передаваться не будет из-за проскальзывания полумуфт. Следовательно, остановятся ведомые обоймы с храповыми колесами, и начнется передача вращения по тихоходным, но высокомоментным кинематическим цепям к шпинделям гайковерта, т.е. начнется процесс окончательной затяжки резьбовых соединений.

Учитывая, что процесс окончательной затяжки происходит синхронно, гайковерт обеспечивает требуемое качество сборки. Угол поворота шпинделей контролируется датчиком импульсов за счет взаимодействия с полумуфтой при ее осевом перемещении при достижении предельного момента настройки. При достижении требуемого числа импульсов датчика (требуемого угла поворота шпинделя) обесточивается электродвигатель.

Гайковерт обладает дополнительным достоинством за счет использования дифференциальных механизмов, которые автоматически следят за уравниванием моментов сопротивления на шпинделях. Когда момент сопротивления на одном из шпинделей кинематической цепи одной из ветвей дифференциалов возрастает, эта быстроходная кинематическая цепь останавливается, а вторая начинает вращаться с удвоенной угловой скоростью, догоняя первую по моменту сопротивления вращению.

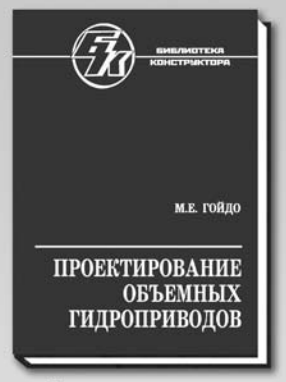
Кроме того, если по каким-либо причинам кратковременно возрастает момент сопротивления при завинчивании (например, вследствие зазубрины или забоины на резьбе), после дифференциала останавливается быстроходная кинематическая ветвь вращения. Срабатывает механизм свободного хода, передавая большой момент, который преодолевает кратковременное повышение момента сопротивления. Затем дифференциальный механизм начинает передавать быстрое вращение.

На основании разработанной и опробованной на практике методики оценки точности осевых сил затяжки групповых резьбовых соединений установлено, что погрешности осевых сил разработанного многошпиндельного гайковерта не превышают 2,5 %.

Таким образом, разработана кинематическая схема многошпиндельного гайковерта нового класса, обеспечивающего высокую точность затяжки групповых резьбовых соединений.

Библиографический список

1. **Житников Б.Ю., Симаков А.Л.** Методология разработки универсальных, высокоточных, многошпиндельных завинчивающих устройств нового класса: Монография под общ. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: КГТА, 2002. 216 с.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ ГИДРОПРИВОДОВ

(Библиотека конструктора)

М.Е. Гойдо

2009. – 304 с. ISBN: 978-5-94275-427-3

Цена 440 р. с НДС

Приведены классификация объемных гидроприводов; правила выполнения их схем; математическое описание процессов, происходящих при работе гидроприводов; типовые схемные решения, используемые при проектировании объемных гидроприводов; выбор параметров и исследование характеристики работы объемных гидроприводов различного назначения и исполнения при разных условиях нагружения; применение САПР при проектировании гидроприводов.

Для инженеров-конструкторов, изготовителей, а также обслуживающего персонала гидрооборудования, может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 004.896:621.865

Л.В. Божкова, *д-р техн. наук,* **М.В. Воловов** *(МГТУ "МАМИ")*
e-mail: maxon9921@yandex.ru

Оптимизация программного управления сборочным роботом с пассивной адаптацией

Построена математическая модель динамики манипулятора промышленного робота типа SKILAM, в которой учтены упругие связи в схвате. Полученная модель реализована на компьютере. В результате найдено время выполнения заданной технологической операции.

The mathematical model of dynamics of the manipulator of the Industrial Robot of type SKILAM in which elastic links in a gripper are considered is constructed. The received model is realized on a computer. Certain time of execution of the set technological operation is as result discovered.

Ключевые слова: сборочный робот, схват, программное движение, момент позиционирования, погрешность позиционирования, амплитуда колебаний.

Key words: assemble robot, gripper, program driving, the moment of positioning, error of positioning, amplitude of oscilations.

Возможность быстрой переналадки промышленных роботов (ПР) с одной сборочной операции на другую оправдывает замену в сборочных комплексах специальных автоматических устройств на ПР. Это соответствует актуальной проблеме использования гибких производственных систем в настоящее время.

Однако ПР, как правило, уступают по быстродействию специальным устройствам, что уменьшает их производительность. Таким образом, в современных условиях рыночных конкурентных отношений задача повышения производительности ПР приобретает большую значимость.

Первым шагом, который может привести к резкому повышению быстродействия ПР, должна быть реализация совместных движений всех звеньев манипулятора робота. Следующий шаг – увеличение скоростей и ускорений всех звеньев. Однако это может привести к резкому росту амплитуд колебаний, обусловленных наличием упругих элементов, и в конечном итоге – к увеличению ошибок позиционирования.

Таким образом, требования по быстродействию и точности ПР противоречивы, их следует рассматривать совместно с путем решения оптимизационной задачи, основой которой должна быть математическая модель динамики механической системы ПР. Именно этому актуальному вопросу посвящена настоящая работа.

При построении математической модели динамики манипулятора ПР в работе [1] учтен ряд параметров, оказывающих наиболее существенное влияние на точность позиционирования ПР. На основе полученной модели ПР предложен алгоритм построения программного управления сборочным ПР, обеспечивающий высокую точность позиционирования. Однако в указанной математической модели ПР не учтены упругие связи в схвате, которые при пассивной адаптации могут оказать заметное влияние на точность позиционирования.

В связи с этим в данной работе строится математическая модель динамики ПР типа SKILAM, SCARA для этапа транспортировки детали к месту монтажа с учетом упругих связей в схвате, т.е. с применением пассивного метода адаптации. Пассивный метод адаптации в ряде случаев более предпочтителен благодаря его простоте и низкой стоимости.

На рис. 1 приведена кинематическая схема манипулятора ПР и показаны системы координат $P_j x_j y_j z_j$ $(j = 1, 2, 3)$, жестко связанные с соответствующими звеньями. Составим дифференциальные уравнения движения для манипулятора ПР и отдельно – для транспортируемой детали.

Манипулятор ПР имеет три степени свободы (без учета движения схвата). За обобщенные ко-

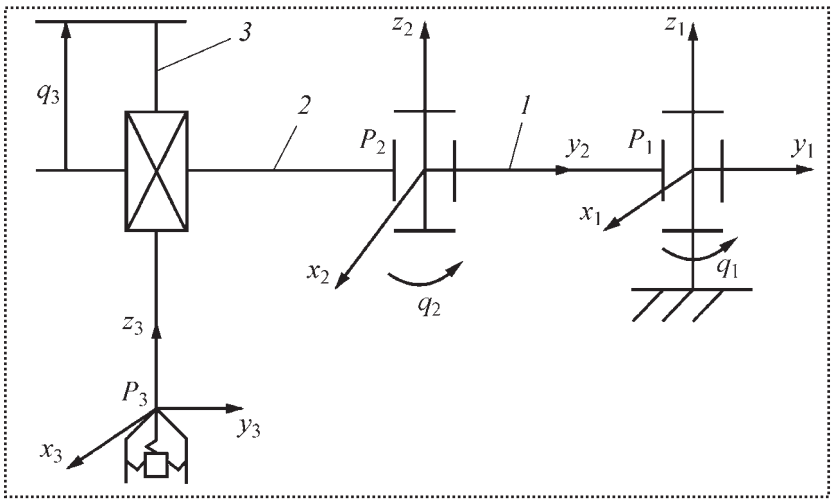


Рис. 1. Кинематическая схема манипулятора ПР:
1 – 3 – звенья

ординаты возьмем параметры $q_j\,(j=1,2,3)$, определяющие перемещение каждого из звеньев относительно предыдущего звена.

Представим дифференциальные уравнения движения манипулятора в форме уравнений Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j}-\frac{\partial T}{\partial q_j}=Q_j, \qquad (1)$$

где T – кинетическая энергия системы;

$Q_j\,(j=1,2,3)$ – обобщенные силы.

Кинетическая энергия механической системы (без учета транспортируемого груза) имеет вид:

$$T=\frac{1}{2}(a_{11}\dot{q}_1^2+2a_{12}\dot{q}_1\dot{q}_2+a_{22}\dot{q}_2^2+a_{33}\dot{q}_3^2+ \\ +b_{11}\dot{q}_1^2+2b_{12}\dot{q}_1\dot{q}_2+b_{22}\dot{q}_2^2), \qquad (2)$$

где

$$a_{11}=J_{z_1}^{(1)}+J_{z_2}^{(2)}+J_{z_3}^{(3)}+m_2l_1^2+ \\ +m_3(l_1^2+l_2^2)+2b_{13}\cos q_2; \\ a_{33}=m_3;\ a_{12}=m_3l_2^2+b_{13}\cos q_2+J_{z_2}^{(2)}+J_{z_3}^{(3)}; \qquad (3) \\ a_{22}=J_{z_2}^{(2)}+J_{z_3}^{(3)}+m_3l_2^2;\ b_{11}=i_1^2J_p^{(1)};\ b_{22}=i_2^2J_p^{(2)}; \\ b_{12}=i_2J_p^{(2)};\ b_{13}=m_2\left|P_2C_2\right|l_1+m_3l_1l_2.$$

В выражения (3) введены следующие обозначения:

m_2, m_3 – массы соответственно второго и третьего звеньев со схватом;

l_1, l_2 – длины первых двух звеньев;

$\left|P_2C_2\right|$ – расстояние центра тяжести второго звена от его собственной оси вращения;

$J_p^{(1)}, J_p^{(2)}$ – моменты инерции роторов соответствующих двигателей относительно их собственных осей вращения;

i_1, i_2 – передаточные числа соответствующих редукторов;

$J_{z_j}^{(j)}\,(j=1,2,3)$ – моменты инерции соответствующих звеньев манипулятора относительно неразрывно связанных с ними осей координат $z_j\,(j=1,2,3)$, являющихся их главными осями инерции (см. рис. 1).

Следует ожидать, что колебания упругозакрепленной в схватке детали на движение звеньев манипулятора практически не оказывают влияния. При этом дифференциальные уравнения движения манипулятора ПР можно представить в виде

$$(a_{11}^{(n)}+b_{11})\ddot{q}_1^{(n)}+(a_{12}^{(n)}+b_{12})\ddot{q}_2^{(n)}- \\ -2b_{13}\sin q_2^{(n)}\dot{q}_1^{(n)}\dot{q}_2^{(n)}- \\ -b_{13}\sin q_2^{(n)}\dot{q}_2^{(n)2}=i_1M_{д1}^{(n)}; \\ (a_{12}^{(n)}+b_{12})\ddot{q}_1^{(n)}+(a_{22}+b_{22})\ddot{q}_2^{(n)}+ \\ +b_{13}\sin q_2^{(n)}\dot{q}_1^{(n)2}=i_2M_{д2}^{(n)}; \\ m_3\ddot{q}_3^{(n)}=-(m_3+m_5)q+P_{д3}^{(n)}, \qquad (4)$$

где $a_{11}^{(n)}$ и $a_{12}^{(n)}$ находят на основании соотношений (3) при $q_2=q_2^{(n)}$;

$M_{д1}^{(n)}, M_{д2}^{(n)}, P_{д3}^{(n)}$ – соответственно моменты и усилие двигателей, необходимые для реализации заданного программного движения.

Далее необходимо рассмотреть отдельно упругозакрепленную в схвате деталь. При этом будем считать, что адаптивная пассивная сборочная головка допускает упругие поступательные перемещения детали в направлении трех взаимоперпендикулярных осей.

На рис. 2 показаны системы координат $c_4x_4y_4z_4$ и $c_5x_5y_5z_5$, жестко связанные соответственно со схватом и деталью. Начала координат (точки c_4 и c_5) выбраны в центрах масс соответствующих тел.

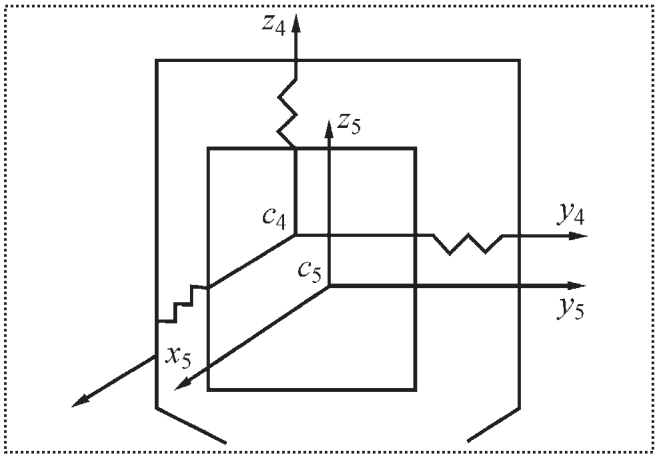


Рис. 2. Кинематическая схема упругозакрепленной в схвате детали

Предполагаем, что в положении равновесия системы координат $c_4x_4y_4z_4$ и $c_5x_5y_5z_5$ совпадают, а коэффициенты жесткости упругих элементов в направлениях координатных осей равны между собой: $c_x = c_y = c_z = c$. При этом дифференциальные уравнения движения транспортируемой детали будут иметь вид:

$$\begin{aligned} m_5\ddot{x}_{c_5} &= -c(x_{c_5} - x_{c_4}); \\ m_5\ddot{y}_{c_5} &= -c(y_{c_5} - y_{c_4}); \\ m_5\ddot{z}_{c_5} &= -c(z_{c_5} - z_{c_4}), \end{aligned} \qquad (5)$$

где m_5 – масса детали;

$x_{c_4}, y_{c_4}, z_{c_4}$ и $x_{c_5}, y_{c_5}, z_{c_5}$ – координаты центра масс соответственно схвата и детали в неподвижной системе координат.

Координаты центра масс схвата в неподвижной системе определяются по формулам:

$$\begin{aligned} x_{c_4} &= l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2); \\ y_{c_4} &= -[l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2)]; \\ z_{c_4} &= q_3 - l_3 - C_4P_3, \end{aligned} \qquad (6)$$

где l_3 – длина третьего звена;

C_4P_3 – расстояние от центра масс схвата до начала системы координат, связанной с третьим звеном.

Учитывая, что движение рассматриваемой механической системы должно быть близким к программному движению робота без упругих связей в схвате, дифференциальные уравнения (5) движения детали линеаризованы и приведены к виду:

$$\begin{aligned} m_5\ddot{\psi}_1 + c\psi_1 &= -m_5\ddot{x}_{c_4}^{(n)}; \\ m_5\ddot{\psi}_2 + c\psi_2 &= -m_5\ddot{y}_{c_4}^{(n)}; \\ m_5\ddot{\psi}_3 + c\psi_3 &= -m_5\ddot{z}_{c_4}^{(n)}, \end{aligned} \qquad (7)$$

где $x_{c_4}^{(n)}, y_{c_4}^{(n)}, z_{c_4}^{(n)}$ – программные значения координат центра масс схвата;

$\psi_j (j = 1,2,3)$ – отклонения координат центра масс детали от программных значений соответствующих координат центра масс схвата.

Правые части дифференциальных уравнений (7) можно определить на основании соотношений (6).

Полученное аналитическое решение реализовано на компьютере для случая трапецеидального закона изменения программных скоростей звеньев манипулятора (рис. 3).

На рис. 3 $t_{Pj}, t_{Tj}, t_{Kj} (j = 1,2,3)$ – соответственно время разгона, начала торможения и позиционирования; $w_{jy} (j = 1,2,3)$ – установившиеся скорости звеньев.

При этом законы изменения обобщенных программных скоростей будут представлены следующими соотношениями:

$$\dot{q}_j^{(n)} = \begin{cases} \varepsilon_{Pj} t, \text{ если } 0 < t \le t_{Pj}, \\ w_{yj}, \text{ если } t_{Pj} < t \le t_{Tj}, \\ w_{yj} - \varepsilon_{Tj}(t - t_{Tj}), \text{ если } t_{Tj} < t \le t_{Kj}, \end{cases} \qquad (8)$$

где ε_{Pj} и $\varepsilon_{Tj} (j = 1,2,3)$ – соответственно ускорения разгона и торможения.

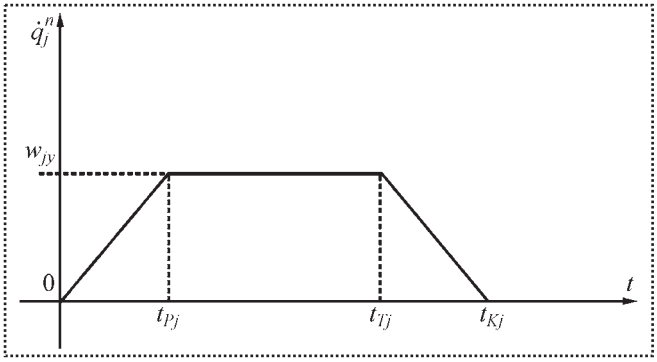


Рис. 3. Трапецеидальный закон изменения программных скоростей $\dot{q}_j^n$ звеньев манипулятора

На основании (8) можно определить законы изменения обобщенных программных ускорений и координат звеньев манипулятора.

Время разгона, начала торможения и позиционирования каждого из звеньев определяется соответственно соотношениями:

$$t_{Pj} = \frac{w_{yj}}{\varepsilon_{Pj}};$$
$$t_{Tj} = \frac{q^{n}_{Kj}}{w_{yj}} + \frac{w_{yj}}{2}\left(\frac{\varepsilon_{Tj} - \varepsilon_{Pj}}{\varepsilon_{Tj}\varepsilon_{Pj}}\right); \qquad (9)$$
$$t_{Kj} = \frac{q^{(n)}_{Kj}}{w_{yj}} + \frac{w_{yj}}{2}\left(\frac{\varepsilon_{Tj} + \varepsilon_{Pj}}{\varepsilon_{Tj}\varepsilon_{Pj}}\right),$$

где $q^{(n)}_{Kj}\,(j = 1,2,3)$ – значения обобщенных программных координат в положении позиционирования робота.

Учитывая, что время разгона не может быть больше времени начала торможения (см. рис. 3), должно выполняться следующее неравенство:

$$\frac{w^2_{yj}}{2}\left(\frac{\varepsilon_{Pj} + \varepsilon_{Tj}}{\varepsilon_{Pj}\varepsilon_{Tj}}\right) \le q^{(n)}_{Kj}. \qquad (10)$$

Зная значения обобщенных программных координат в начальном и конечном положениях манипулятора (соответственно $q^{(n)}_{jo}$, $q^{(n)}_{Kj}$ $(j = 1,2,3)$), а также максимально допустимые скорости $w_{yj}\,(j = 1,2,3)$, развиваемые приводами робота, и выбирая различные значения ускорений разгона ε_{Pj} и торможения ε_{Tj}, можно построить различные законы программных движений звеньев манипулятора. Не все эти законы могут быть осуществлены приводами данного ПР, так как моменты и усилие, развиваемые приводами, не могут превышать максимально допустимой величины:

$$M^{(n)}_{Д_1} \le M_{Д_1\max};\, M^{(n)}_{Д_2} \le M_{Д_2\max};\, P^{(n)}_{Д_3} \le P_{Д_3\max}. \qquad (11)$$

Уравнения Лагранжа второго рода (4) позволяют определить, какие из рассмотренных программных движений манипулятора могут быть осуществлены приводами данного ПР.

Таким образом, для определения погрешностей позиционирования, вызванных наличием упругих связей в схвате, необходимо решить систему трех дифференциальных уравнений (7) с учетом (8)–(11). Как следует из (7), транспортируемая деталь совершает вынужденные колебания. При этом возмущающая сила зависит от характера программного движения звеньев манипулятора ПР.

Дифференциальные уравнения движения детали (7) могут быть приведены к виду:

$$\ddot{\psi}_1 + k^2\psi_1 = f_1(t);$$
$$\ddot{\psi}_2 + k^2\psi_2 = f_2(t); \qquad (12)$$
$$\ddot{\psi}_3 + k^2\psi_3 = f_3(t),$$

где $k^2 = \dfrac{c}{m_5}$ – k-круговая частота собственных колебаний детали;

функции $f_i(t)\,(i = 1,2,3)$ определяются на основании (6).

Определив параметры $\psi_j\,(j = 1,2,3)$ в момент позиционирования $\psi_{kj}\,(j = 1,2,3)$, погрешность позиционирования можно определить по формуле

$$\Delta = \sqrt{\psi^2_{k1} + \psi^2_{k2} + \psi^2_{k3}}. \qquad (13)$$

Дифференциальные уравнения (12) колебаний детали будем решать при нулевых начальных условиях. Далее при вычислениях будем считать, что ускорение разгона и торможения равны между собой, т.е.

$$\varepsilon_{Pj} = \varepsilon_{Tj} = \varepsilon_j\,(j = 1,2,3). \qquad (14)$$

При этом ограничение (10) примет вид:

$$\frac{w^2_{yj}}{\varepsilon_j} \le q^{n}_{Kj}\,(j = 1,2,3). \qquad (15)$$

На основании (9) в случае, когда имеет место соотношение (14), программное время движения каждого звена определим по формуле

$$t_{Kj} = \frac{q^{(n)}_{Kj}}{w_{yj}} + \frac{w_{yj}}{\varepsilon_j}\,(j = 1,2,3). \qquad (16)$$

Нетрудно убедиться, что минимальное время позиционирования будет в случае, когда устано-

вившаяся скорость звеньев манипулятора определяется соотношением

$$w_{jy} = \sqrt{q_{Kj}^{(n)} \varepsilon_j} \, (j = 1, 2, 3). \qquad (17)$$

На основании (16) и (17) определяем минимально возможное программное время позиционирования звеньев манипулятора при заданных $q_{Kj}^{(n)}$ и $\varepsilon_j \, (j = 1, 2, 3)$:

$$t_{Kj\,\min} = 2\sqrt{\frac{q_{Kj}^{(n)}}{\varepsilon_j}} \, (j = 1, 2, 3). \qquad (18)$$

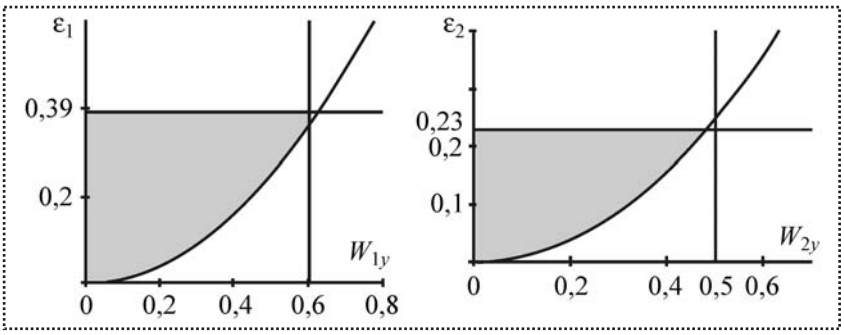


Рис. 4. Области возможных значений скорости и ускорений первого и второго звеньев (затемнены)

Так как движение третьего звена динамически независимо, то далее будем рассматривать совместные движения только первых двух звеньев манипулятора. При этом погрешность позиционирования в плане (в горизонтальной плоскости) определяется по формуле

$$\Delta_n = \sqrt{\psi_{k_1}^2 + \psi_{k_2}^2}. \qquad (19)$$

Для решения поставленной задачи прежде всего необходимо оценить возможные границы изменения ускорений $\varepsilon_j \, (j = 1, 2)$, которые могут обеспечить приводы данного ПР.

Наибольшие моменты приводов необходимы в момент троганья звеньев (в начальный момент). Поэтому оценить границы изменения ускорения можно на основании следующих приближенных соотношений, полученных из (4) при условии, что в начальный момент скорости трогания звеньев равны нулю.

Численное решение задачи проведено при следующих данных: m_2 = 23,5 кг; m_3 = 7 кг; $J_z^{(1)}$ = 19,7 кг·м^2; $J_z^{(2)}$ = 9 кг·м^2; $J_z^{(3)}$ = 0,001 кг·м^2; $J_p^{(1)}$ = 0,01 кг·м^2; $J_p^{(2)}$ = 0,0003 кг·м^2; i_1 = 242; i_2 = 153; l_1 = 0,63 м; l_2 = 0,4 м; $|P_2C_2|$ = 0,28 м; m_5 = 1 кг; c = 100…150 Н/м; $q_{1k}^{(n)} = q_{2k}^{(n)} = \frac{\pi}{3}$ рад; $q_{3k}^{(n)}$ = 0,2 м; $q_{j0}^{(n)}$ = 0 (j = 1, 2, 3).

Кроме того, было учтено, что максимально возможные моменты и усилия, развиваемые двигателями, равны

$$M_{1\max} = 0{,}195\,\text{Н·м}; \; M_{2\max} = 0{,}065\,\text{Н·м}; \; P_{3\max} = 0{,}1\text{Н},$$

а максимально допустимые скорости звеньев манипулятора

$$\dot{q}_{1\max} = 0{,}6\,\text{рад/с}; \; \dot{q}_{2\max} = 0{,}5\,\text{рад/с}; \; \dot{q}_{3\max} = 1\text{м/с}. \qquad (20)$$

При этом должна быть обеспечена погрешность позиционирования 0,05 мм.

Таким образом, на основании (4) найдены максимально возможные ускорения звеньев при их совместном движении:

$$\varepsilon_{1\max} = 0{,}39\,\text{с}^{-2}, \; \varepsilon_{2\max} = 0{,}23\,\text{с}^{-2}. \qquad (21)$$

Области возможных значений скорости и ускорения каждого звена при $q_{k1}^{(n)} = q_{k2}^{(n)} = \frac{\pi}{3}$ определены графически (рис. 4) с помощью соотношения (15) с учетом (20) и (21).

В каждой из указанных областей выбраны девять различных вариантов сочетания скорости и ускорения (табл. 1 и 2) первого и второго звеньев манипулятора ПР, которые могут быть обеспечены соответствующими приводами.

Таблица 1

Варианты сочетания значений скорости и ускорения первого звена

w_1 \ ε_1	0,2	0,3	0,45
0,2	(0,2; 0,2)	(0,2; 0,3)	(0,2; 0,45)
0,3	(0,3; 0,2)	(0,3; 0,3)	(0,3; 0,45)
0,39	(0,39; 0,2)	(0,39; 0,3)	(0,39; 0,45)

Таблица 2

Варианты сочетания значений скорости и ускорения второго звена

w_2 \ ε_2	0,2	0,3	0,4
0,16	(0,16; 0,2)	(0,16; 0,3)	(0,16; 0,4)
0,2	(0,2; 0,2)	(0,2; 0,3)	(0,2; 0,4)
0,23	(0,23; 0,2)	(0,23; 0,3)	(0,23; 0,4)

Далее построим табл. 3, в которой приведен 81 вариант различных сочетаний кинематических параметров ε_1, w_1 и ε_2, w_2 двух звеньев манипулятора ПР.

Таким образом, на основании соотношений (8), (9) и табл. 3 можно построить 81 вариант возможных программных движений манипулятора ПР, которые могут быть обеспечены приводами данного робота.

Для каждого из рассмотренных вариантов программного движения манипулятора ПР найдено решение системы дифференциальных уравнений (12). При этом определены значения функций ψ_1 и ψ_2 в момент позиционирования робота (при $t = t_k^n$):

$$\psi_{1k} = \psi_1(t_k^n), \psi_{2k} = \psi_2(t_k^n).$$

Время движения каждого из двух звеньев ($t_{k1}^{(i)}, t_{k2}^{(j)}$) для соответствующего варианта значений $\varepsilon_1^{(i)}, w_1^{(i)}, \varepsilon_2^{(j)}, w_2^{(j)}$ определяется на основании (16). Бо̀льшая из двух найденных величин $t_{k1}^{(i)}$ и $t_{k2}^{(j)}$ соответствует моменту позиционирования ПР для конкретного варианта программного движения.

Таблица 3

Варианты сочетаний кинематических параметров ε_1, w_1 и ε_2, w_2 двух звеньев

i	j \ $\varepsilon_2; w_2$ / $\varepsilon_1; w_1$	1 (0,16; 0,2)	2 (0,16; 0,3)	3 (0,16; 0,4)	4 (0,2; 0,2)	5 (0,2; 0,3)	6 (0,2; 0,4)	7 (0,23; 0,2)	8 (0,23; 0,3)	9 (0,23; 042)
1	(02; 0,2)	(0,2; 0,2); (0,16; 0,2)	(0,2; 0,2); (0,16; 0,3)	(0,2;0,2); (0,16;0,4)	(0,2; 0,2); (0,2; 0,2)	(0,2; 0,2); (0,2; 0,3)	(0,2;0,2); (0,2;0,4)	(0,2; 0,2); (0,23; 0,2)	(0,2;0,2); (0,23;0,3)	(0,2; 0,2); (0,23; 042)
2	(0,2;0,3)	(0,2; 0,3); (0,16; 0,2)	(0,2; 0,3); (0,16; 0,3)	(0,2;0,3); (0,16;0,4)	(0,2; 0,3); (0,2; 0,2)	(0,2; 0,3); (0,2; 0,3)	(0,2; 0,3); (0,2; 0,4)	(0,2; 0,3); (0,23; 0,2)	(0,2;0,3); (0,23;0,3)	(0,2; 0,3); (0,23; 042)
3	(0,2;0,45)	(0,2; 0,45); (0,16; 0,2)	(0,2; 0,45); (0,16; 0,3)	(0,2;0,45); (0,16;0,4)	(0,2; 0,45); (0,2; 0,2)	(0,2;0,45); (0,2;0,3)	(0,2;0,45); (0,2;0,4)	(0,2; 0,45); (0,23; 0,2)	(0,2;0,45); (0,23;0,3)	(0,2; 0,45); (0,23; 042)
4	(0,3; 0,2)	(0,3; 0,2); (0,16; 0,2)	(0,3; 0,2); (0,16; 0,3)	(0,3;0,2); (0,16;0,4)	(0,3; 0,2); (0,2; 0,2)	(0,3;0,2); (0,2;0,3)	(0,3;0,2); (0,2;0,4)	(0,3; 0,2); (0,23; 0,2)	(0,3;0,2); (0,23;0,3)	(0,3; 0,2); (0,23; 042)
5	(0,3; 0,3)	(0,3; 0,3); (0,16; 0,2)	(0,3; 0,3); (0,16; 0,3)	(0,3;0,3); (0,16;0,4)	(0,3; 0,3); (0,2; 0,2)	(0,3;0,3); (0,2;0,3)	(0,3;0,3); (0,2;0,4)	(0,3;0,3); (0,23;0,2)	(0,3;0,3); (0,23;0,3)	(0,3; 0,3); (0,23; 042)
6	(0,3; 0,45)	(0,3; 0,45); (0,16; 0,2)	(0,3; 0,45); (0,16; 0,3)	(0,3;0,45); (0,16;0,4)	(0,3; 0,45); (0,2; 0,2)	(0,3;0,45); (0,2;0,3)	(0,3;0,45); (0,2;0,4)	(0,3; 0,45); (0,23; 0,2)	(0,3;0,45); (0,23;0,3)	(0,3; 0,45); (0,23; 042)
7	(0,39; 0,2)	(0,39; 0,2); (0,16; 0,2)	(0,39; 0,2); (0,16; 0,3)	(0,39;0,2); (0,16;0,4)	(0,39; 0,2); (0,2; 0,2)	(0,39; 0,2); (0,2; 0,3)	(0,39;0,2); (0,2; 0,4)	(0,39; 0,2); (0,23; 0,2)	(0,39;0,2); (0,23;0,3)	(0,39; 0,2); (0,23; 042)
8	(0,39; 0,3)	(0,39; 0,3); (0,16; 0,2)	(0,39; 0,3); (0,16; 0,3)	(0,39;0,3); (0,16;0,4)	(0,39; 0,3); (0,2; 0,2)	(0,39; 0,3); (0,2; 0,3)	(0,39;0,3); (0,2; 0,4)	(0,39; 0,3); (0,23; 0,2)	(0,39;0,3); (0,23;0,3)	(0,39; 0,3); (0,23; 042)
9	(0,39; 045)	(0,39; 045); (0,16; 0,2)	(0,39; 045); (0,16; 0,3)	(0,39;045); (0,16;0,4)	(0,39; 045); (0,2; 0,2)	(0,39;045); (0,2;0,3)	(0,39; 045); (0,2; 0,4)	(0,39; 045); (0,23; 0,2)	(0,39; 045); (0,23; 0,3)	(0,39; 045); (0,23; 042)

Таблица 4

Время позиционирования ПР при различных законах программного движения

j	i		1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$(\varepsilon_2, \omega_2)$										
	$(\varepsilon_1, \omega_1)$	$t_{k2}^{(i)}$ / $t_{k1}^{(j)}$	(0,16; 0,2)	(0,16; 0,3)	(0,16; 0,4)	(0,2; 0,2)	(0,2; 0,3)	(0,2; 0,4)	(0,23; 0,2)	(0,23; 0,3)	(0,23; 0,4)
			6,25	5,21	5	6	4,83	4,5	5,87	4,63	4,24
1	(0,2; 0,2)	6	6,25	6	6	6	6	6	6	6	6
2	(0,2; 0,3)	4,83	6,25	5,21	5	6	4,83	4,83	5,87	4,83	4,83
3	(0,2; 0,45)	4,47	6,25	5,21	5	6	4,83	4,5	5,87	4,63	4,47
4	(0,3; 0,2)	5,67	6,25	5,67	5,67	6	5,67	5,67	5,87	5,67	5,67
5	(0,3; 0,3)	4,33	6,25	5,21	5	6	4,83	4,5	5,87	4,63	4,33
6	(0,3; 0,45)	3,72	6,25	5,21	5	6	4,83	4,5	5,87	4,63	4,24
7	(0,39; 0,2)	5,51	6,25	5,51	5,51	6	5,51	5,51	5,87	5,51	5,51
8	(0,39; 0,3)	4,1	6,25	5,21	5	6	4,83	4,5	5,87	4,63	4,24
9	(0,39; 0,45)	3,37	6,25	5,21	5	6	4,83	4,5	5,87	4,63	4,24

В табл. 4 приведены значения времени позиционирования ПР при различных вариантах сочетаний кинематических параметров двух звеньев ($\varepsilon_1^{(i)}, w_1^{(i)}, \varepsilon_2^{(j)}, w_2^{(j)}$), т.е. при различных законах программного движения.

Во внутренней матрице указано время позиционирования ПР при соответствующих комбинациях кинематических параметров звеньев.

Погрешность для каждого варианта закона программного движения определяется по формуле:

Таблица 5

Варианты законов программного движения манипулятора, обеспечивающих требуемую точность позиционирования (0,05 мм) при *C* = 100 Н/м

№	ε_1; w_1	ε_2; w_2	Δ, м	t_k^n, с
1	(0,3; 0,45)	(0,23; 0,4)	0,0496	4,24
2	(0,3; 0,3)	(0,23; 0,4)	0,049	4,33
3	(0,2; 0,45)	(0,23; 0,4)	0,0485	4,47
4	(0,2; 0,45)	(0,2; 0,4)	0,048	4,5
5	(0,2; 0,45)	(0,23; 0,3)	0,0476	4,63
6	(0,2; 0,3)	(0,23; 0,3)	0,047	4,83
7	(0,2; 0,3)	(0,23; 0,3)	0,0462	5
8	(0,2; 0,3)	(0,16; 0,3)	0,0458	5,21
9	(0,39; 0,2)	(0,16; 0,4)	0,0455	5,51
10	(0,3; 0,2)	(0,16; 0,3)	0,0452	5,67

$$\Delta_{ij} = \sqrt{\psi_{1k}^2 + \psi_{2k}^2}\,(i = 1, 2, \ldots, 9, j = 1, 2, \ldots, 9). \quad (22)$$

Те из законов программного движения манипулятора ПР, при которых погрешность позиционирования не превышает заданную точность его позиционирования $\delta = 0{,}05$ мм, т.е. удовлетворяет неравенству

$$\Delta_{ij} \le \delta, \quad (23)$$

можно применять в сборочных операциях. Оптимальный закон программного движения удовлетворяет неравенству (23) и соответствует наименьшему времени выполнения заданной технологической операции.

Результаты счета на компьютере, представленные в табл. 5, показывают, что наименьшее время выполнения заданной технологической операции равно 4,24 с. При этом оптимальному закону программного движения соответствуют $\varepsilon_1 = 0{,}3$ с$^{-2}$; $w_1 = 0{,}45$ с$^{-1}$; $\varepsilon_2 = 0{,}23$ с$^{-2}$; $w_2 = 0{,}4$ с$^{-1}$.

Таким образом, построена и реализована на компьютере математическая модель динамики манипулятора, позволяющая вычислять время выполнения операции.

Библиографический список

1. **Божкова Л.В., Чуканова О.В., Акульшина Т.В., Воловов М.В.** Разработка алгоритмов программного управления сборочных промышленных роботов / Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2008, №2, с. 8–12.

СТАНОЧНЫЕ ГИДРОПРИВОДЫ:
справочник (Библиотека конструктора). **В.К. Свешников**

2008. – 640 с.: ил. ISBN: 978-5-217-03438-3

Цена 770 р. с НДС

Приведены конструкции, основные параметры, габаритные и присоединительные размеры гидрооборудования главным образом стационарных машин, в том числе насосов, объемных гидродвигателей, гидроаппаратов, фильтров, аккумуляторов, теплообменников, приборов и сопутствующих товаров отечественного и частично зарубежного производства. Излагаются основы проектирования и расчета гидросистем, их монтажа и эксплуатации, а также основополагающие отечественные стандарты и стандарты ИСО. Справочник содержит максимум сведений, необходимых в практике проектирования и эксплуатации гидрооборудования, выполняя информационную и учебную функцию.

В 5-м издании (4-е изд. 2004 г.) существенно обновлены справочно-информационные сведения, проанализированы основные тенденции развития гидрооборудования мировых лидеров, дано описание ряда новейших зарубежных комплектующих изделий, чаще всего отсутствующих в отечественной номенклатуре (современные насосы и гидродвигатели, новая аппаратура, в том числе ввертного монтажа, аппараты связи с электронными системами управления, приборы и др.); приведены характеристики минеральных масел, размеры специальных резьб.

Для инженеров-конструкторов, изготовителей, а также обслуживающего персонала гидрооборудования стационарных машин (в том числе станков), может быть полезен преподавателям и студентам втузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.43.001.573

А.А. Макушин, Е.В. Зубков, *канд-ты техн. наук;*
А.Н. Илюхин *(Камская государственная инженерно-экономическая академия)*
e-mail: Lexusil@mail.ru

Применение нечеткой логики для моделирования режимов испытаний двигателей внутреннего сгорания

Рассмотрены основные функции принадлежности и построена на их основе лингвистическая переменная. Разработана имитационная модель двигателя внутреннего сгорания (ДВС) на основе нечеткой логики и ее основные характеристики. Сформированы правила иерархической структуры базы знаний нечеткого контроллера для имитационной модели. Разработана система нечеткого вывода при имитации режимов работы ДВС. Произведена декомпозиция процесса моделирования испытаний ДВС.

The main membership functions are considered and the linguistic variable has been constructed. The simulation model of engine on base of fuzzy logic and it's key features was developed. The rules of fuzzy controller hierarchic structure of knowledge base for simulation model are formulated. The defuzzyfication system at regime's simulation has been worked out. The decomposition of modeling engine was performe.

Ключевые слова: имитационная модель, лингвистическая переменная, нечеткая логика, нечеткие правила, нечеткий контроллер, функция принадлежности.

Key words: linguistic variable, fuzzy logic, fuzzy rules, fuzzy controller, fuzzy set.

На многих этапах жизненного цикла (при конструировании, доводке, производстве, сертификации, эксплуатации, ремонте) автомобильные и тракторные ДВС колесных и гусеничных машин, мобильных и стационарных агрегатов подвергаются различного рода испытаниям, объем и трудоемкость которых, как показывает практика, увеличивается. Возрастает и сложность испытаний.

И это вполне объяснимо: в практике двигателестроения надежно работающие элементы ДВС используются в новых моделях, отличающихся для увеличения мощности форсированными по среднему эффективному давлению рабочего цикла режимами, приводящими к повышению уровня тепловых и механических нагрузок на основные детали и сопряжения.

Увеличить надежность и ресурс ДВС, улучшить их параметры можно лишь при тщательном изучении происходящих в них процессов. Важным этапом в конструировании, производстве, контроле качества, эксплуатации и ремонте ДВС является процесс испытания.

Проведение испытаний связано с большими затратами труда, времени и средств.

Применение моделирования работы двигателя вместо непосредственных испытаний позволит сократить время, уменьшить экономические затраты и облегчить работу инженера-технолога. Модель двигателя должна быть адекватной не только при имитации установившихся режимов работы, но и при изменяющейся нагрузке, поскольку на такие режимы работы приходится 90 % времени эксплуатации. Модель ДВС должна позволить реализовать все необходимые режимы испытаний, соответствующие реальным условиям эксплуатации двигателей.

В основном автоматические системы испытаний построены на использовании строгих математических моделей объектов. Однако для подавляющего большинства как искусственных, так и естественных объектов управления построение точных математических моделей практически невозможно ввиду их недостаточной формализуемости. К тому же эти объекты могут функционировать в среде, свойства которой изменяются или же вообще не могут быть определены заранее.

В случае плохой формализуемости объектов управления особый интерес вызывают системы,

построенные на новых, интеллектуальных принципах [1]. В этих системах используются такие направления искусственного интеллекта, как нечеткая логика, экспертные системы, генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети.

Формирование лингвистической переменной на основе функции принадлежности

Целесообразность применения нечеткой логики распространяется на объекты, которые характеризуются большим числом неопределенностей, например, неточность информации, поступающей с датчиков, или неточность модели объектов контроля. Результаты расчетов по имитационной модели будут считаться адекватными, если они попадают в интервал значений. Применение нечеткой логики в моделировании работы объектов позволяет оценить совокупное влияние каждого параметра на конечный итог вычислений, а при применении других методов происходит пренебрежение неосновными параметрами, что приводит к ошибочному результату.

В любой ситуации признак объекта проблемной области имеет одно и только одно четкое значение из согласованного множества базовых и одно или более чем одно нечеткое значение из соответствующего множества нечетких значений. Интуитивное отношение между базовым и нечетким значениями объектной переменной выражается более точно с помощью функции принадлежности μ.

Функция μ (x, T) отображает базовое значение x и нечеткое значение T в интервале [0; 1]. По определению $0 < \mu(x, T) < 1$ для x и T. Применение функции принадлежности позволяет на следующем уровне иерархической базы данных сохранить измеренные параметры, преобразованные в величины нечетких меток B_j. Эти данные сохраняются в иерархической базе данных на уровне нечетких меток.

Наиболее часто применимыми функциями принадлежности являются треугольная функция и Гауссово распределение, а для граничных участков – сигмоидные функции.

Для описания режимов работы двигателя на лингвистических переменных используем симметричную функцию распределения Гаусса, которая имеет следующий аналитический вид [2]:

$$f(x,\sigma,c)=e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}},$$

где x – базовое множество;

c – вершина Гауссова распределения;

σ – ширина распределения.

Выбор данного распределения определен тем, что данная функция проста в использовании и не имеет жесткого перехода из одного диапазона в другой, как треугольная и трапециевидная.

Несмотря на то что Гауссова функция принадлежности обладает свойствами гладкости, она не позволяет формировать асимметричные функции принадлежности. Для этих целей применяются сигмоидные функции, которые могут быть открыты либо слева, либо справа, в зависимости от типа функций, и используются для описания крайних значений. В аналитической форме сигмоидная функция записывается следующим образом [2]:

$$f(x,a,c)=\frac{1}{1+e^{-a(x-c)}},$$

где a – ширина распределения (в зависимости от знака функция будет открыта справа или слева);

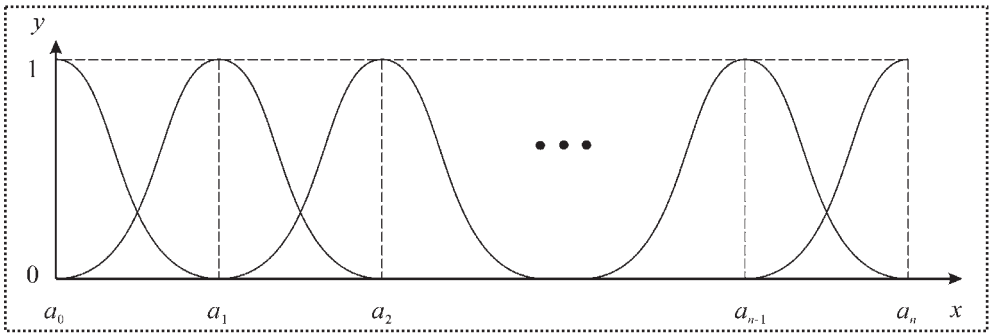


Рис. 1. Графическое представление нечеткого множества *A*

c – среднее значение распределения.

В зависимости от знака параметра a рассматриваемая функция принадлежности будет открыта либо справа, либо слева, что позволит применять ее для описания таких нечетких понятий, как "очень большой" или "крайне отрицательный".

Таким образом, нечеткое множество A будет образовано на основе функций принадлежности Гауссова распределения и сигмоидной функции. В графическом виде нечеткое множество A представлено на рис. 1.

Расширение имитационной модели на основе синтаксических и семантических правил

Для формирования иерархии имитационной модели необходимо определиться с количеством N измеряемых величин и управляющего параметра, на основе которых образуются нечеткие множества, и с числом лингвистических переменных в каждом нечетком множестве.

Иерархическая структура будет иметь вид, представленный на рис. 2. Здесь $a, b, c, \ldots z$ – нечеткие множества измеряемых параметров, f – нечеткое множество регулируемого параметра.

Данная иерархическая структура заполняется на основе проведенных испытаний и может иметь следующее распределение по уровням входных параметров:

• лингвистическая переменная A, состоящая из нечетких меток $\{a_1, a_2, \ldots, a_m\}$, характеризует изменение по оборотам двигателя, например {1000, 1200, ..., 2600};

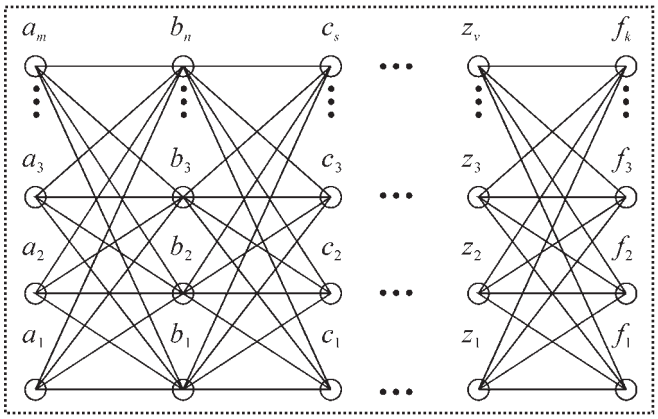


Рис. 2. Иерархическая структура нечеткого управления

• лингвистическая переменная B, состоящая из нечетких меток $\{b_1, b_2, \ldots, b_n\}$, характеризует изменение внешней нагрузки, например {50, 100, ..., 300};

• лингвистическая переменная C, состоящая из нечетких меток $\{c_1, c_2, \ldots, c_s\}$, характеризует изменение режимов работы двигателя по оборотам, например, замедление, установившееся значение, разгон.

Выходным параметром является лингвистическая переменная F, состоящая из нечетких меток $\{f_1, f_2, \ldots, f_k\}$, которая характеризует положение рейки топливного насоса высокого давления, например {0,5; 1; ...; 20}.

Число уровней как входных, так и выходных параметров может быть изменено и дополнено в зависимости от типа испытаний, которые инженер-технолог проводит или модулирует.

На основе этой иерархии формируется база знаний нечеткого контроллера. Она представляет собой последовательность вариантов входных нечетких меток и соответствующих им выходов и имеет вид:

ЕСЛИ a_1 И b_1 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ a_2 И b_1 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

.....

ЕСЛИ a_1 И b_2 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ a_2 И b_2 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

.....

ЕСЛИ a_1 И b_1 И c_2 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ a_2 И b_1 И c_2 И ... И z_1 ТО f_i,

.....

ЕСЛИ a_{m-1} И b_n И c_s И ... И z_v ТО f_i,

ЕСЛИ a_m И b_n И c_s И ... И z_v ТО f_i,

где f_i – значение из диапазона $f_1, f_2, \ldots, f_k$.

Данная база знаний расширяется на основе синтаксических правил нечеткой логики, например, при использовании операции пересечения. Если наше базовое значение можно отнести с равной вероятностью к двум соседним меткам a_i и a_{i+1}, то в этом месте формируется новая нечет-

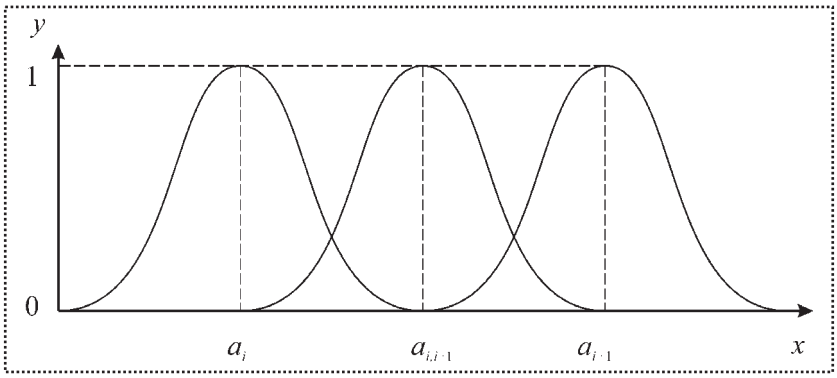


Рис. 3. Графическое представление операции пересечения

кая метка $a_{i,\,i+1}$. В результате добавления новой метки формируется новое правило, которое возникает как усредненное управляющее значение a_i и a_{i+1}.

Операция пересечения графически представлена на рис. 3.

В результате применения для расширения базы знаний операции объединения улучшается точность имитационной модели и иерархическая структура примет вид, изображенный на рис 4.

На основе иерархической структуры формируется база знаний нечеткого контроллера, которая выглядит следующим образом:

ЕСЛИ a_1 И b_1 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ $a_{1,2}$ И b_1 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ a_2 И b_1 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

.....

ЕСЛИ a_1 И b_2 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ $a_{1,2}$ И b_2 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ a_2 И b_2 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

.....

ЕСЛИ a_1 И b_1 И c_2 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ $a_{1,2}$ И b_1 И c_2 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ a_2 И b_1 И c_2 И ... И z_1 ТО f_i,

.....

ЕСЛИ a_{m-1} И b_n И c_s И ... И z_v ТО f_i,

ЕСЛИ $a_{m-1,\,m}$ И b_n И c_s И ... И z_v ТО f_i,

ЕСЛИ a_m И b_n И c_s И ... И z_v ТО f_i .

На основе семантических правил каждой новой нечеткой метке находится соответствующее значение выходного параметра f_i. Предположим, что в лингвистической переменной A на основе грамматических правил пересечения сформировалась новая нечеткая метка $a_{i,\,i+1}$. Для нее формируется новое правило, выходной параметр которого находится как среднее арифметическое двух соседних меток, между которыми она располагается:

ЕСЛИ a_i И b_1 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i,

ЕСЛИ $a_{i,\,i+1}$ И b_1 И c_1 И ... И z_1 ТО $(f_i + f_{i+1})/2$,

ЕСЛИ a_{i+1} И b_1 И c_1 И ... И z_1 ТО f_i.

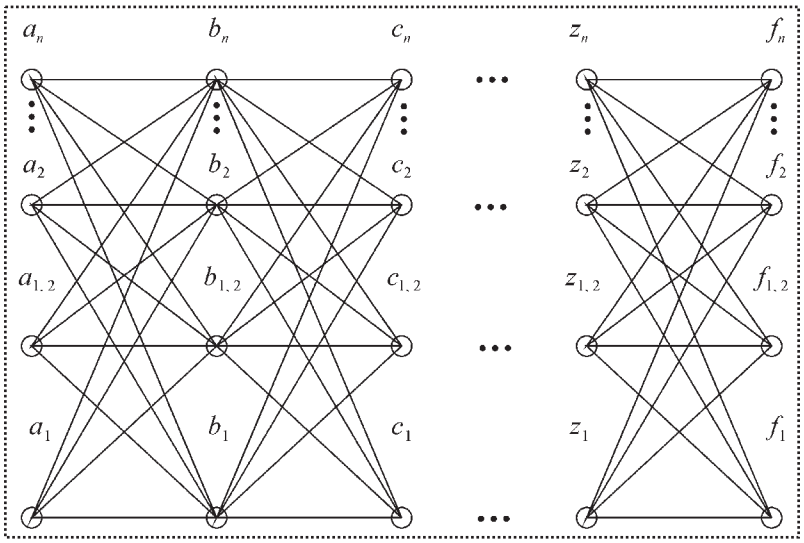


Рис. 4. Расширенная иерархическая структура нечеткого управления

Формирование четкого вывода на основе алгоритма Суджено

На основе базы нечетких правил и функций принадлежности интеллектуальная система осуществляет логический вывод. Распространены пять схем нечеткого вывода: Мамдани, Цукамото, Суджено, Ларсена и упрощенная схема [3, 4]. Для вывода четких значений на основе нечетких меток выбираем алгоритм Суджено. Это объясняется тем, что простота его применения позволит сократить время обработки информации, а использование в нем среднего суммирующего значения для каждой лингвистической переменной способствует получению высокой точности.

На основе функций принадлежности можно определить степень отнесения переменной к той или иной нечеткой метке. Степень принадлежности переменной x к нечетким меткам a_i и a_{i+1} показана на рис. 5.

Тогда выходная переменная z относительно лингвистической переменной A определяется следующим образом:

$$fa = a_i \cdot \mu(a_i) + (a_{i+1}) \cdot \mu(a_{i+1}),$$

где fa – выходная переменная f относительно лингвистической переменной A;

a_i и a_{i+1} – нечеткие метки, принадлежащие лингвистической переменной A;

$\mu(a_i)$ и $\mu(a_{i+1})$ – принадлежность переменной x к соответствующей нечеткой метке;

x – четкое значение переменной A.

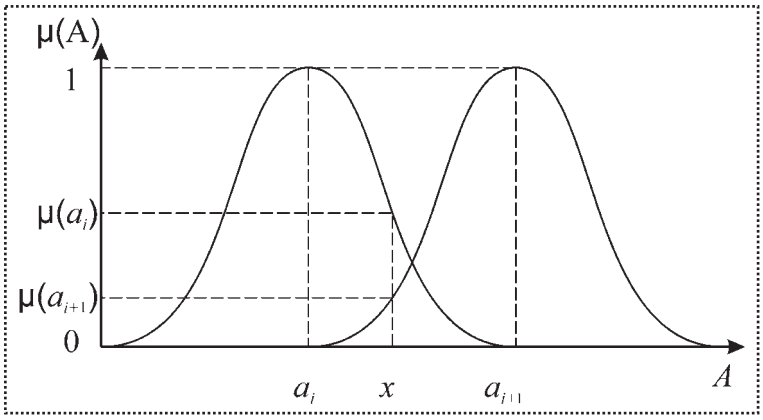


Рис. 5. Степень принадлежности переменной x к нечетким меткам a_i и a_{i+1}

При этом в остальных лингвистических переменных выбираются те нечеткие метки, для которых степень принадлежности максимальная.

Аналогично вычисляются значения выходных переменных и по другим лингвистическим переменным $B, C \ldots Z$. Таким образом, нечеткий вывод определяется как среднеарифметическое значение выходных лингвистических переменных:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^{n} f_i}{n},$$

где f – четкое выходное значение;

f_i – выходная переменная f относительно соответствующей лингвистической переменной;

N – число лингвистических переменных.

Декомпозиция имитационной модели ДВС

Имитация работы ДВС на основе нечеткой логики опирается на многоуровневую базу данных. Взаимодействие между уровнями можно представить в виде декомпозиции, описывающей преобразование входных параметров в выходные. База данных в этом случае будет иметь пять уровней.

На первом уровне сохраняется программа испытаний. В ней содержатся данные о модели двигателя, типе испытаний, входные и выходные параметры.

В зависимости от программы испытаний на втором уровне определяются режимы работы двигателя, а также время их протекания. На данном уровне целесообразно применить когнитивную графику, позволяющую технологу-испытателю более просто задать последовательность требуемых режимов работы, не прибегая к помощи программистов, а также более полно представить создаваемую программу испытания.

Все время испытаний разбивается на интервалы, в которых будет производиться имитация работы ДВС. Интервалы должны быть как можно меньше, так как это ведет к увеличению точности управления, но при уменьшении интервалов происходит увеличение требуемых ресурсов вычислительной техники. На основании этих величин опре-

деляется количество точек, на которых будет проводиться моделирование.

На третьем уровне декомпозиции производится сохранение величин всех параметров в заданные промежутки времени.

Используя функции принадлежности, на четвертом уровне все заданные параметры, которые необходимо получить на выходе, переводятся в нечеткие метки.

На более низком уровне сохраняются нечеткие значения входных параметров, созданных на основе лингвистических переменных и базы знаний нечетких правил.

На самом нижнем уровне сохраняются четкие значения параметров, которые получены на основе нечеткого вывода, а также выходных и входных нечетких меток, сохраненных на предыдущих уровнях.

Выводы

Технолог-испытатель может не только проводить испытания, но и моделировать работу двигателя. Преимущество применения нечеткой логики для испытаний заключается в возможности проанализировать взаимосвязи между уровнями иерархической структуры имитационной модели, что очень важно при проведении исследовательских испытаний. Возможность выбирать лингвистические переменные, составляющие структуру базы знаний, позволяет технологу-испытателю сформировать модель, имитирующую работу двигателя, с интересующей его точки зрения и получить высокую степень соответствия реальным характеристикам тех параметров, которые он выбрал.

Применение нечеткой логики позволяет выбирать заданную точность имитационной модели, которая зависит от выбора расположения нечетких меток. Если их расположить далеко друг от друга, то это приведет к увеличению ошибки выходных параметров модели, а если функции принадлежности не будут перекрываться, то при имитации работы объекта будет исключено влияние данного входного параметра. В обратном случае, если расстояние между нечеткими метками выбрать очень маленьким, это приведет к увеличению точности имитационной модели и числа самих меток, но при этом значительно увеличится время обучения.

Если для имитации работы объекта выбрать расстояние между нечеткими метками равным 10 %-ному интервалу погрешности, то точность увеличивается в 2 раза за счет применения синтаксических и семантических правил решения имитационной модели. В результате можно получить 5 %-ную погрешность, что удовлетворяет адекватности испытаний согласно [5, 6].

Библиографический список

1. **Захаров В.Н.** Современная информационная технология в системах управления // Известия академии наук. Теория и системы управления – 2000, № 1, с. 70–78.

2. **Ярушкина Н.Г.** Основы нечетких и гибридных систем: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2004. 320 с.

3. **Кофман А.** Введение в теорию нечетких множеств: Пер. с фр. – М.: Радио и связь, 1982. 432 с.

4. **Кузин Л.Т.** Основы кибернетики: В 2-х т. Т.2. Основы кибернетических моделей: Учеб. пособие. – М.: Энергия, 1979.

5. **Дизели** тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. ГОСТ 15995–80. 57 с.

6. **Двигатели** автомобильные. Методы стендовых испытаний. ГОСТ 14846–81. 55 с.

Черменский О.Н., Федотов Н.Н.

Монтаж, демонтаж и обслуживание подшипников качения*

Подшипники качения являются высокоточными компонентами. Но монтаж и демонтаж колец часто требует применения больших усилий. Если установка колец производилась без должной тщательности, подшипники могут получить повреждения. В этих случаях долговечность подшипников будет намного меньше расчетной. Статья содержит некоторые правила монтажа и демонтажа и выбора для этой работы надлежащих инструмента и оборудования.

The roller bearings are precision components. But mounting and dismounting rings often requires the applications with high forces. If installation of rings were accomplished without great care the bearings may be damaged. In these cases the lives of bearing will be far less than calculated. This article gives some instruction on mounting and dismounting bearings and of tools and equipment appropriate choice.

Ключевые слова: подшипник качения, монтаж, демонтаж, обслуживание, инструмент, оборудование.

Key words: roller bearing, mounting, dismounting, service, tool, equipment.

Для монтажа подшипников средних размеров, как правило, необходимы значительные усилия. Поэтому вместо механических инструментов преимущественно используют гидравлические. При демонтаже средних и крупных подшипников целесообразно применять метод подачи масла под давлением между шейкой вала и отверстием подшипника. Если распрессовывается подшипник с конической шейкой вала, то осевая составляющая силы давления (вследствие конусности) сама сдвигает подшипник. В связи с этим для предотвращения вылета с вала демонтируемого подшипника перед подачей масла необходимо обеспечить для него упор, например навернуть гайку.

Демонтаж внутренних безбортовых колец роликоподшипников удобно производить, применяя нагрев. Для этого могут быть использованы нагревательные кольца, которые называют также термостяжными. Процесс демонтажа предельно прост. Сначала снимают наружное кольцо с роликами и сепаратором. Затем внутреннее кольцо покрывают термостойким (не окисляющим) маслом. После этого нагревательное кольцо с температурой 280 °С надвигают на внутреннее кольцо подшипника и зажимают с помощью рукояток. Как только внутреннее кольцо подшипника освобождается, его снимают вместе с нагревательным кольцом. Если необходимо часто демонтировать кольца подшипников разных размеров, удобно использовать для этой цели индукционные нагреватели, настраиваемые на различные размеры.

Подшипники малых и средних размеров на закрепительных втулках можно демонтировать с помощью молотка и монтажной втулки, упирающейся в гайку закрепительной втулки или в кольцо подшипника. Нельзя для этой цели пользоваться выколоткой, так как в этом случае легко повредить подшипник или закрепительную втулку. Следует замаркировать положение закрепительной втулки, чтобы восстановить его при повторном монтаже.

Наиболее эффективный инструмент для демонтажа подшипников на закрепительных втулках – гидравлические гайки. Однако в этом случае необходимо, чтобы подшипник упирался в заплечик вала и было бы достаточно места для выдвижения закрепительной втулки. Кроме того, должен быть предусмотрен упор для кольцевого поршня гидравлической гайки. Этот упор может быть образован установкой в кольцевой паз вала составного кольца, охватываемого цельным кольцом, либо шайбой, привинченной к торцу вала.

Гидравлическая гайка навинчивается на закрепительную втулку, при этом зазор между ней и подшипником должен быть несколько больше, чем осевое перемещение подшипника при монтаже. Затем масло нагнетается в гайку до тех пор, пока подшипник не освободится.

Подшипники малых и средних размеров на стяжных втулках можно демонтировать с помощью накидного или ударного ключей. Резьбу стяжной втулки и торец подшипника следует смазать дисульфидмолибденовой пастой или

* Начало в № 5, 7, 2009.

другой подобной смазкой. Затем навинтить гайку на втулку и затянуть с помощью ударного или накидного ключа до момента, пока стяжная втулка не выскользнет из подшипника.

Демонтаж больших подшипников также целесообразно производить с применением гидравлических гаек. Их навинчивают так, чтобы кольцевой поршень касался внутреннего кольца подшипника. Затем насосом нагнетают масло до тех пор, пока стяжная втулка не выскользнет из подшипника. Стяжные втулки больших подшипников обычно имеют отверстия и канавки для подачи масла под давлением между втулкой и подшипником и между валом и втулкой. Это позволяет радикально уменьшить усилие, необходимое для демонтажа подшипника.

Обслуживание подшипников

Долговечность подшипников в подавляющем большинстве механизмов существенно зависит от качества обслуживания. Примеры обслуживания механизмов, внеплановые остановки которых не приводят к тяжелым последствиям, обычно не сложны.

В процессе работы регулярно контролируется температура подшипника. Для этой цели пригодны контактные термометры. Повышенная температура подшипникового узла указывает на ненормальную работу подшипника. Кроме того, нагрев может отрицательно повлиять на смазочный материал. Длительная работа при температуре свыше 125 °С может привести к снижению долговечности подшипника. Причиной повышения температуры может служить как недостаточное, так и избыточное смазывание, повышенные нагрузки, загрязнение смазочного материала, слишком малый зазор в подшипнике, чрезмерный натяг, а также сильное трение в уплотнениях.

Периодичное смазывание проводят согласно руководству по обслуживанию или в соответствии с рекомендациями, изложенными в [2]. Если используется пластичная смазка, то плановое повторное смазывание производится небольшим количеством. Периодически следует удалять отработанную пластичную смазку или выдавливать ее из корпуса через специально предусмотренные отверстия. Перед запрессовкой свежей смазки нужно очистить смазочные ниппели. Если в корпусе не предусмотрены ниппели для повторного смазывания, то необходимо снять верхнюю половину корпуса или боковую крышку и удалить отработанную смазку, а корпус заполнить свежей смазкой того же сорта.

При использовании масла периодически проверяют его состояние. Для этого берется немного масла в качестве пробы и сравнивается со свежим маслом. Если проба замутнена, то в масле имеется вода и его следует заменить. Изменение цвета или потемнение может быть признаком загрязнения смазочного материала или результатом интенсивного старения.

При смазывании масляной ванной достаточно заменить масло один раз в год, если температура подшипника не превышает 50...60 °С и масло не загрязняется. При более высокой температуре требуется более частая замена масла: при температуре свыше 100 °С – один раз в три месяца, свыше 120 °С – каждый месяц и свыше 130 °С– каждую неделю.

Для контроля качества масла поставляется портативный прибор OilCheck. Сравнение результатов измерений этим прибором нового и находящегося в эксплуатации масел позволяет определить пригодность последнего для дальнейшего использования для смазывания подшипника. Принцип работы прибора основан на измерении диэлектрической постоянной масла, которая зависит от степени его деградации и загрязнения.

Другим показателем состояния работы подшипника является уровень вибрации и частотные характеристики производимого подшипником шума. С помощью портативных виброметров типа CMVP и MARLIN можно надежно диагностировать состояние вращающихся подшипников качения. Технология основана на способе измерения вибраций в ультразвуковом диапазоне. Приборы, реализующие такую технологию, указывают на такие дефекты, как недостаточное либо неправильное смазывание, перегрузка или возникновение повреждений дорожек и тел качения.

В тех случаях, когда выход подшипников приводит к тяжелым последствиям, следует устанавливать непрерывно работающие диагностические приборы с соответствующим программным обеспечением для быстрой и точной диагностики и оценки результатов, а также автоматической остановкой механизма.

Библиографический список

1. **Подшипники качения**: Справочник-каталог / Л.В. Черневский, Р.В. Коросташевский, Б.А. Яхин и др.; Под общ. ред. Л.В. Черневского и Р.В. Коросташевского. М.: Машиностроение, 1997. 896 с.

2. **Справочник SKF** по техническому обслуживанию подшипников качения. 1995. SKF. Публикация 4100 R. 335 с.

Проектирование технических средств обработки данных с учетом требований автоматизации сборки*

Описана методика проектирования устройств, позволяющая упростить сборочные операции и уменьшить число собираемых компонентов. Она предусматривает составление перечня всех функций, выполняемых проектируемым устройством, и всех деталей и промежуточных сборочных узлов по степени их важности для выполнения функций проектируемого изделия; выделение съемных частей устройства.

Предложена методика параллельного совершенствования конструкции изделия и системы, с помощью которой оно будет изготовляться. Применение описанной методики повышает вероятность успешного внедрения системы автоматической сборки.

The technique of designing of the devices is described, allowing to simplify assembly operations and to reduce number of collected components. It provides drawing up of the list of all functions which are carried out by the projected device, and all details and intermediate assembly knots on degree of their importance for performance of functions of a projected product; allocation of demountable parts of the device.

The technique of parallel perfection of a design of a product and system with which help it will be produced is offered. Application of the described technique raises probability of successful introduction of system of automatic assemblage.

Ключевые слова: проектирование устройств, сборочные операции, автоматизация, автоматическая сборка.

Key words: designing of devices, assembly operations, automation, automatic assemblage.

Введение. Для производства технических средств обработки данных характерны небольшие размеры серий выпускаемых изделий. Это настоятельно требует повышения технологической гибкости производственного оборудования до такой степени, чтобы на нем можно было выпускать различные изделия. Чтобы добиться этого для всех этапов изготовления отдельных компонентов и сборки готовой продукции, необходимо тщательно отбирать наилучшие конструкции изделий и технологические приемы их производства. В таких условиях к конструкции изделия неизбежно предъявляются дополнительные требования, а именно минимальное количество составных частей и наиболее простая технология сборки. Соблюдение этих требований позволит применить для сборки автоматическое оборудование или, по крайней мере, сильно упростить неавтоматизированные сборочные операции.

Как показывает опыт авторов, наиболее удобное для сборки изделие не обязательно состоит из минимально возможного числа деталей. Поэтому при анализе качества проекта изделия следует учитывать степень его соответствия обоим дополнительным требованиям.

Методика проектирования. Практически любое современное техническое изделие представляет собой продукт эволюции. Почти всегда в нем можно найти наиболее удачные принципы, детали или сборочные узлы, уже использовавшиеся ранее. Как следствие этой закономерности в составе многих изделий появляются некоторые части, отдельные свойства и функции которых ничего не дают для функционирования изделия в целом.

Методика проектирования с позиций упрощения сборки и минимизации количества деталей может потребовать перестройки технического мышления. Иногда необходимо "остановиться, оглянуться" и внимательно проанализировать: что же за изделие мы проектируем и для чего оно будет использоваться.

Предлагаемый подход к проектированию достаточно прост и прямолинеен. Во-первых, следует составить список всех известных на момент проектирования функций, выполняемых изделием в целом и его отдельными частями. Этот список может быть обширным или кратким в зависимости от того, какие функции разработчик

* **Гибкие** сборочные системы. Под ред. У.Б. Хегинботама. Пер. с англ. Д.Ф. Миронова. Под ред. А.М. Покровского. – М.: Машиностроение, 1988.

изделия считает существенным. В список вносятся функции, выполняемые как отдельными деталями и сборочными узлами, так и изделием в целом.

Далее следует составить перечень всех определенных к моменту проектирования деталей и узлов изделия и составить его эскиз в разобранном виде.

На этом этапе нет необходимости подробно рассматривать устройство сборочных узлов и деталей, достаточно констатировать их наличие.

На следующем шаге принимается одно из важнейших проектных решений: следует определить степень важности отдельных частей устройства. После того как это сделано, можно достаточно просто найти основную идею конструкции. Эта идея может быть подсказана конструкцией изделия-предшественника, устройством какой-либо детали, палеты, использующейся на сборке, или оборудованием, с помощью которого предполагается собирать изделие.

Любому конструктору известно, что наиболее важные размеры в изделии по возможности должны обеспечиваться одной деталью. Такой подход позволяет упростить расчет допусков на изготовление деталей и снижает вероятность того, что при окончательной сборке их придется "подгонять". Точность выдерживания функционально важных размеров изделия в этом случае обеспечивается станками и оборудованием, на котором изготовляются детали.

Уменьшить количество деталей, входящих в состав изделия, позволяет применение методики проектирования, разработанной в Массачуссетском технологическом институте Бутройдом и др. в 1982 г. в рамках программы упрощения сборочных операций. В случаях, когда функционально важный размер невозможно обеспечить одной деталью, необходимо всесторонне проанализировать влияние, которое будет оказывать на сборку и эксплуатацию изделия получившееся соединение.

Список съемных деталей и узлов определяет те части изделия, конструкция которых предусматривает их быстрое и простое отсоединение. Это — очень важное свойство, сильно влияющее на ремонтопригодность, которая, в свою очередь, играет большую роль при определении общей стоимости изделия. Поэтому необходимо выделить съемные части изделия. Правильное выделение съемных частей помогает сократить общее количество деталей и упростить сборочные операции.

На следующем шаге следует рассмотреть устройство крышек и корпусов. Удачно спроектированные крышки и корпуса не только придают изделию изящный вид, они обеспечивают структурную цельность конструкции, увеличивают ее жесткость, фиксируют отдельные узлы. В некоторых случаях на крышках и корпусах можно устанавливать печатные платы, кроме того, они предохраняют части изделия от механических повреждений.

Однако размещать на крышках и корпусах индикаторы, переключатели, предохранители и любые другие детали, к которым подводятся провода, не следует. Размещая такие детали на основных сборочных узлах с доступом к ним через окна в корпусе, можно избавиться от многих кабелей и жгутов. Выбор конфигурации последних также представляет собой очень важный этап проектирования. Еще раз отметим: грамотное проектирование жгутов и съемных частей снижает количество внутренних соединений в устройстве, упрощая его сборку и техническое обслуживание.

На следующем шаге определяется последовательность сборки изделия. Каждая деталь должна найти в этой последовательности подходящее место. Если какая-либо из них "не вписывается" в последовательность сборки, можно воспользоваться одним из следующих приемов:

объединить две детали и далее рассматривать их как сборочный узел;

изменить конструкцию изделия;

применить вспомогательные сборочные приспособления, впоследствии удаляемые из изделия;

ввести в состав изделия сборочное приспособление;

ввести в последовательность сборки неавтоматизированную сборочную операцию.

В любом случае автоматическая сборочная система может быть создана только на базе анализа изделия в целом, его деталей, сборочных операций, операций контроля и процесса эксплуатации изделия в том виде, как они представ-

ляются проектировщику на этапе проектирования изделия.

Проектирование изделия представляет собой первый этап многозвенного производственного процесса. Именно на этом этапе в конструкцию изделия закладываются все ресурсы повышения эффективности производства, все факторы, ограничивающие ее, все возможные автоматизации процесса сборки.

Совершенствование сборочного оборудования идет довольно медленно, и многочисленные усилия по созданию универсальных сборочных машин пока не приводят к убедительным результатам. Поэтому часто проектирование нового изделия, предназначенного для сборки на автоматической системе, выполняется параллельно с разработкой нового специализированного сборочного оборудования.

Одновременность проектирования изделия и оборудования для его выпуска накладывает на конструктора дополнительную ответственность, так как:

• конструкция изделия должна обеспечивать высокое качество;

• параметры конструкции изделия, влияющие на качество его сборки, должны быть четко выделены.

Для того чтобы справиться с этим очень сложным заданием, конструктор должен быть знаком с общими принципами проектирования изделий с учетом особенностей автоматических сборочных систем.

Рационализация сборочного процесса.

Рационализацию сборочного процесса следует понимать в самом широком смысле как оптимизацию и изготовляемого продукта, и производства в целом. При подобной комплексной оптимизации принимаются в расчет многие факторы. Однако можно выделить четыре главные цели.

Повышение эффективности сборки (увеличение производительности сборочного оборудования, взятое относительно дополнительных капиталовложений и затрат на кадровое обеспечение).

Улучшение качества продукции (приобретение новых свойств, взятое относительно увеличения стоимости).

Повышение экономической эффективности сборочной системы (увеличение коэффициента использования оборудования).

Улучшение условий труда на сборке.

Как правило, любая производственная система консервативна; поскольку изменения производственного процесса и продукции неизбежно влекут за собой как предсказуемые, так и неожиданные последствия, изменений следует избегать. В связи с этим реорганизацию сборки следует рассматривать не как самоцель, а как переходный этап на пути к полной перестройке производства, преследующей четыре упомянутые выше цели.

Рационализация проектирования.

Обычно конструктор создает проект изделия в следующей последовательности: вначале вчерне продумывается устройство отдельных частей, затем разрабатываются способы их соединения в одно целое, наконец, конструкция всех деталей прорабатывается во всех подробностях.

Как правило, после такой процедуры проектирования, как изготовление отдельных деталей, так и их сборка должны выполняться с довольно высокой точностью. Если возникает необходимость изменить устройство изделия, изменяются отдельные операции изготовления деталей и сборки. Изменение конструкции отдельных деталей тоже влияет на технологический процесс изготовления изделия.

Существенного упрощения сборки можно добиться, отбирая при разработке изделия лучшие проектные решения, позволяющие отказаться от некоторых деталей или узлов (или, по крайней мере, радикально упростить их монтаж). Иными словами, *при рационализации сборки в первую очередь следует изменять конструкцию изделия так, чтобы сборочные операции оказались излишними или упростились.*

Рационализация производства, ориентированная на изделие.

Если за отправную точку процесса рационализации приходится брать существующие производственные условия (чаще всего – специфику сборочного оборудования), то основные резервы следует искать в использовании оптимальной сборочной системы.

Еще на стадии проектирования изделия конструктор определяет возможную сборочную систему и особенности ее работы в условиях применения сборочных компонентов с заданными характеристиками качества.

При обсуждении вопросов, касающихся автоматизации сборки, нельзя рассматривать отдельные изделия изолированно друг от друга. Дело в том, что изделия, как правило, выпускаются в нескольких вариантах:

некоторые сборочные узлы широкого применения могут применяться в различных изделиях;

некоторые детали могут применяться в различных сборочных узлах или в силу технологических особенностей изготовляться совместно с деталями других типов.

Все это приводит к тому, что проектирование изделия, предназначенного для сборки на автоматической системе, следует рассматривать как введение нового изделия в хорошо продуманную программу производства деталей, сборочных узлов и готовой продукции.

Всегда ли при проектировании следует учитывать специфику автоматической сборки?

Ответ должен быть отрицательным. Основная задача конструктора – обеспечить требуемые свойства изделия при заданных экономических ограничениях. "Время – деньги", поэтому на завершающей стадии проектирования всегда существует тенденция как можно скорее закончить детальную проработку (иными словами, быстрее сделать чертежи, чтобы изделие можно было запустить в производство). В такой ситуации технологическая проработка может составлять лишь малую часть напряженной работы проектного подразделения. Необходимо иметь в виду, что в результате такого компромисса проект может оказаться далеко не оптимальным для автоматизации сборки.

Два подхода к проектированию. Проектирование изделия, предназначенного для сборки на автоматической системе, обычно проходит в несколько этапов. Только тогда, когда конструкция "отработана", изделие запущено в производство и поставляется заказчикам, на передний план выступают вопросы технологичности сборочных операций.

Второй подход к проектированию, несмотря на все свои преимущества, используется реже. Он состоит в том, чтобы уже на самых ранних стадиях проектирования все проектные решения рассматривались с учетом оптимизации сборочного процесса. При таком подходе изделие и сборочная система совершенствуются параллельно.

Области рационализации. Можно выделить следующие три уровня, на которых может проводиться рационализация производства:

• рационализация ассортимента выпускаемых изделий;

• рационализация отдельных изделий (отдельных узлов и конструкций);

• рационализация отдельных деталей.

В каких бы условиях ни проводилась рационализация – при модернизации существующего или первичном проектировании нового изделия – она может принимать следующие формы.

Расширение "пространства идей" при проектировании. Это помогает находить альтернативные проектные решения, обладающие наилучшими характеристиками для автоматизации сборки.

Последовательное применение принципов проектирования изделий, предназначенных для автоматической сборки: предварительной минимизации числа деталей и последующего совершенствования конструкции изделия.

Проектирование с ориентацией на сборку.

Ассортимент выпускаемых изделий. Основные цели оптимизации сборочного процесса можно сформулировать следующим образом:

■ гарантированное высокое качество продукции;

■ высокая производительность;

■ эффективное использование производственного оборудования;

■ благоприятные условия труда.

Легко выделить факторы, влияющие на достижение каждой из этих целей. Например, на эффективность использования производственного оборудования большое влияние оказывают размеры серий изделий, собираемых без перена-

стройки системы. Отсюда вытекает принцип проектирования: "*избегай введения новых вариантов изделия*" или "*убедись, что все варианты изделия собираются одинаково*".

На производительность системы оказывают влияние количество и длительность простоев производственного оборудования. Из этого вытекает необходимость проектирования системы, способной работать с самыми различными компонентами, или собирать различные изделия из однотипных компонентов.

Таким образом, чтобы достигнуть в процессе оптимизации сборки значительных результатов, следует включить в него рассмотрение всей производственной политики (в частности, определение всей номенклатуры изготовляемой продукции). При этом следует иметь в виду правила, приведенные ниже:

– после сборочных операций необходимо проверять качество их исполнения;

– для автоматической сборки требуется повышенное качество деталей;

– управление сборочным производством – серьезная задача;

– при проектировании следует учитывать возможность механизации сборки;

– при проектировании следует учитывать возможность применения технологически гибкой автоматической сборочной системы;

– у неавтоматизированной сборки есть много недостатков;

– при проектировании следует учитывать особенности стандартного сборочного оборудования;

– при проектировании следует учитывать особенности специализированного сборочного оборудования;

– следует избегать модификации изделия;

– следует убедиться, что все варианты изделия собираются одинаково;

– с помощью автоматизации можно улучшить условия труда;

– следует избегать "опасных" методов сборки.

Безусловно, даже строгое соблюдение этих правил само себе не приводит к решению всех проблем. Каждое правило наиболее эффективно работает только в некоторых случаях, а в другой ситуации оно может оказаться неприменимым. В каждом конкретном случае следует решить, каких правил придерживаться.

Отдельные изделия (*составные части и конструкция*). В принципе общая структура изделия в основном определяет его составные части, но конструктором обычно рассматривается гораздо более детализированная структура (множество отдельных деталей). Это объясняется тем, что помимо обеспечения функционирования изделия конструктор должен выполнить еще многие требования. Поэтому его работа протекает как бы на двух уровнях:

на уровне общей структуры изделия определяются и логически увязываются основные проектные решения;

на "количественном" структурном уровне конструктор определяет значения размеров, допусков, расположение отдельных структурных элементов изделия в пространстве и разбиение их на отдельные детали. На этом уровне определяется функциональное назначение всех компонентов и деталей изделия и выполняется вся подготовительная к детальному проектированию работа.

На этапе структурного проектирования предоставляется много возможностей для анализа альтернативных решений и применения важных принципов проектирования с ориентацией на сборку.

Два главных принципа проектирования – *простота и ясность* – применяются как средства получения оптимальных решений, уменьшения количества используемых деталей и сборочных узлов, упрощения содержания сборочных операций.

Анализируя различные изделия, можно заметить, что при их проектировании применялись различные приемы структурного проектирования. Наиболее часто конкретные проектные решения являются результатом "интеграции" или "дифференциации" (в последнем случае количество используемых компонентов увеличивается). Оба этих приема могут успешно применяться при проектировании изделий, собираемых на автоматических системах. Основные приемы структурного проектирования схематически по-

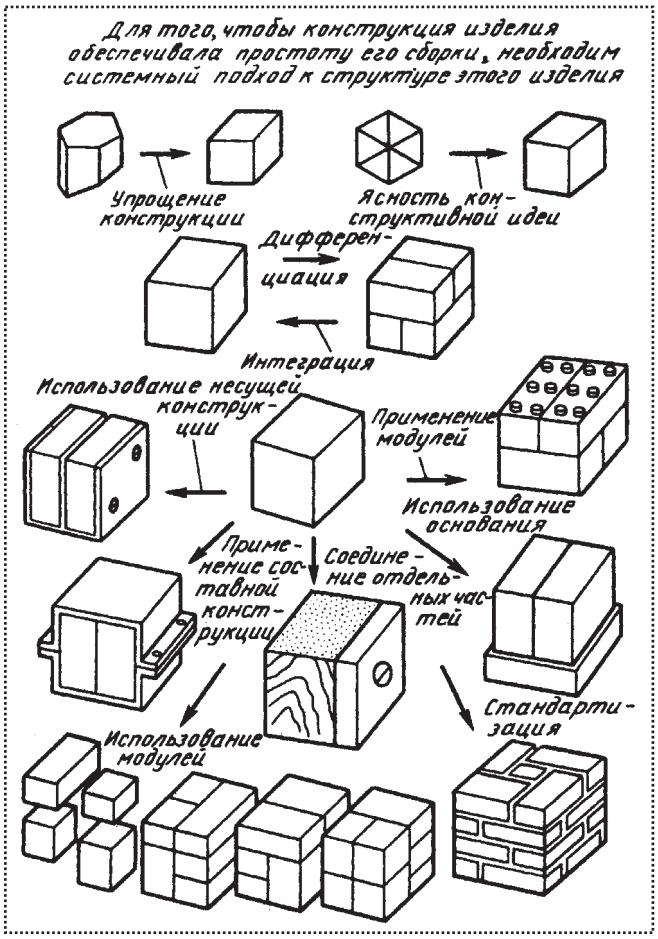


Рис. 1. Основные приемы структурного проектирования

казаны на рис. 1. В качестве примера на рис. 2 показано применение принципа интеграции к конструкции застежки "молнии".

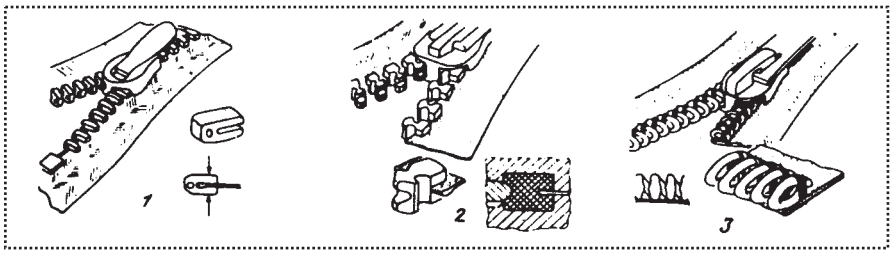


Рис. 2. Три способа изготовления застежки "молнии":
1 – металлические элементы застежки изготовляются методом литья под давлением и по отдельности закрепляются на тканевой ленте; *2* – тканевая лента закладывается в инжекционную литейную машину, и элементы закрепляются в момент отливки; *3* – элементы застежки формируются из пластмассовой нити, изгибы которой фиксируются за счет пришивания свободных концов элементов к тканевой ленте

Компоненты и детали.

В основном конструкция компонентов изделий и способ их сборки определяются на этапах структурного проектирования. Это означает, что выбор структуры изделия во многом определяет задачи, которые должны решаться при его сборке. Тем не менее тщательная проработка конструкции каждой детали позволяет во многом упростить работу сборочной системы.

Под детальным проектированием компонентов будем понимать определение их фундаментальных характеристик: формы, материала, размеров, чистоты обработки поверхностей, допусков.

Качество сборки во многом зависит от этих характеристик. Наибольшее влияние на него оказывает форма собираемых компонентов. Это объясняется тем, что некоторые поверхности компонентов используются как технологические элементы при выполнении сборочных операций.

Поверхности, ограничивающие деталь или сборочный узел, имеют различное назначение. *Функциональные поверхности* обеспечивают выполнение деталью ее основных функций. Из их числа можно выделить *присоединительные поверхности,* которые после сборки соприкасаются с поверхностями других деталей. Поверхности, не несущие функциональной нагрузки, будем называть *свободными*.

Сборочными будем называть поверхности, используемые сборочной системой для ориентирования, транспортировки и придания направления движению детали.

При проектировании изделий, предназначенных для автоматической сборки, следует стремиться к максимальному использованию функциональных поверхностей. Меняя свободные поверхности, можно сделать деталь более удобной для выполнения сборочных операций.

Общение конструктора с технологом обычно сводится к обсуждению всевозможных ограничений и альтернативных проектных решений. Пользуясь эскизами, на которых функциональные и свободные поверхности выделены (например, цветом), конструктор

с технологом проще поймут друг друга. Классификация поверхностей играет важную роль, особенно при проектировании сложных сборочных узлов.

При проектировании деталей следует рассмотреть технологические операции, которые будут выполняться с ее участием, а особенно – центрирование, транспортировку, сочленение и соединение с другими компонентами.

Ниже даны основные принципы детального проектирования.

Основные принципы проектирования деталей.

Избегайте сборочных операций:

– объединяйте детали;

– пользуйтесь технологией однооперационного изготовления укрупненных узлов.

Избегайте операций ориентирования:

– используйте магазинные накопители;

– применяйте скрепление деталей лентой;

– вводите операции изготовления деталей в сборочный процесс.

Упрощайте операцию ориентирования:

– принимайте меры против сцепления деталей;

– не пользуйтесь компонентами низкого качества;

– делайте детали симметричными;

– делайте детали отчетливо асимметричными.

Упрощайте транспортировку:

– проектируйте детали, удобные для транспортировки;

– применяйте несущие приспособления.

Упрощайте схему перемещения деталей при сборке:

– пользуйтесь простыми соединениями;

– предусматривайте направляющие фаски.

Применяйте адекватные способы соединения:

– избегайте соединений;

– не пользуйтесь отдельными крепежными деталями;

– применяйте технологию однооперационного изготовления укрупненных узлов.

Стратегия технологической подготовки сборки.

Выше были рассмотрены некоторые приемы проектирования, помогающие упростить сборку. Эти приемы применяются на разных этапах проектирования: от постановки целей производства и определения ассортимента продукции через определение структуры изделия до детального проектирования его компонентов.

Как следует использовать эти приемы на практике?

Традиционно все вопросы, связанные со сборкой, решаются при технологической подготовке производства. К сожалению, в большинстве случаев определять последовательность сборки и содержание отдельных сборочных операций на этом этапе, когда уже выпущены все чертежи и ведомости и определено взаимодействие отдельных частей изделия, оказывается слишком поздно. К этому моменту конструктор осознанно или неосознанно уже выбрал некоторый способ сборки и закрепил свой выбор в проектных решениях. Поэтому технологическая подготовка сборки должна проводиться одновременно со структурным и детальным проектированием.

Процедура параллельного проектирования и технологической подготовки сборки может протекать, например так, как показано на рис 3. От-

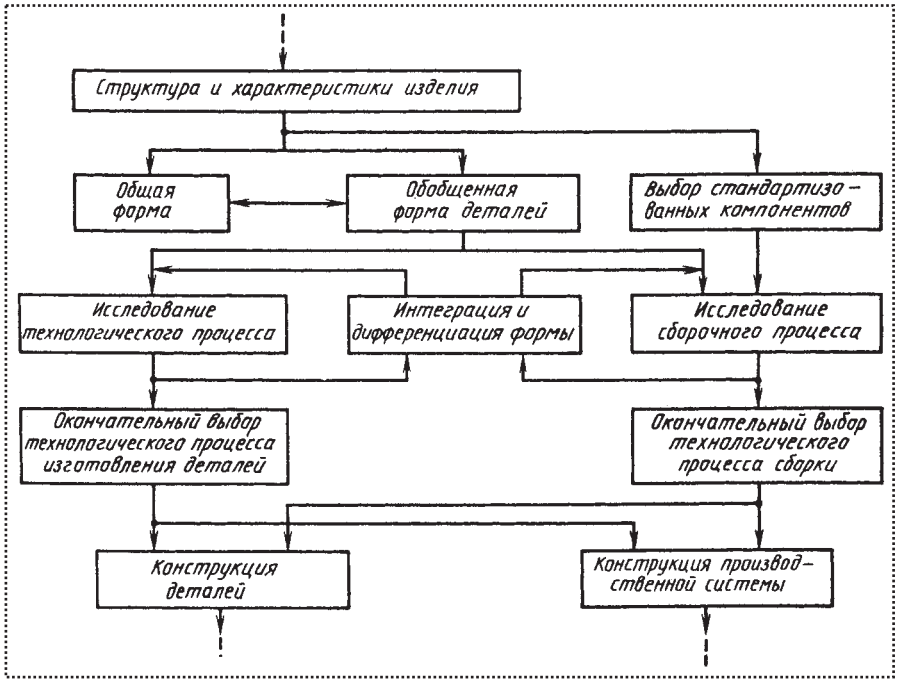


Рис. 3. Поверхности детали выключателя

метим, что в основе этого процесса лежит применение приемов "дифференциация" и "интеграция" (см. рис. 1).

На представленной схеме можно выделить все уровни, на которых могут появиться альтернативы, чей анализ необходим для выбора наилучшего проектного решения. Оценить "качество" одиночного проектного решения практически невозможно.

Заключение. Решения, принятые конструктором при проектировании, определяют от 70 до 80 % себестоимости изделия. Это означает, что роль конструктора в рационализации сборочного процесса весьма велика.

В статье были рассмотрены правила проектирования изделий и стратегия планирования сборочного процесса, применяемые на трех уровнях:

– при определении ассортимента продукции;

– при проектировании изделия;

– при проектировании отдельных деталей.

По опыту авторов, приведенные правила сильно облегчают процесс проектирования. К сожалению, управлять ходом этого процесса, который должен привести к созданию проекта изделия, удобного для сборки, оказывается довольно сложно. Поэтому в будущем сохраняется необходимость общего контроля при использовании описанных методов.

МЕТОДЫ ОБОСНОВАНИЯ РЕСУРСА ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких

Под общ. ред. **Ф.М. Митенкова**

2007. – 448 с. ISBN: 978-5-217-03369-0

Цена 363 р. с НДС

Управление сроком службы оборудования и систем ядерных энергетических установок (ЯЭУ) различного назначения является актуальной и сложной проблемой.

Предлагаемые методология, методы и средства позволят повысить точность прогнозирования ресурса и управление процессом исчерпания ресурса, а тем самым надежности и безопасности эксплуатации ЯЭУ. В монографии рассмотрены основные термины и определения; методология, методы и средства обоснования и прогнозирования ресурса ЯЭУ; механизмы деградации конструкционных материалов; математические модели процессов деформирования, накопления повреждений и развития дефектов; методическое и программное обеспечение расчетов прочности и долговечности оборудования и систем ЯЭУ; методы и средства диагностирования их технического состояния и эксплуатационный мониторинг ресурса ЯЭУ.

Для специалистов, занимающихся вопросами повышения прочности и надежности ЯЭУ, может быть полезна аспирантам и студентам втузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.882.6:006.354

Болты, винты и шпильки. Механические свойства по ГОСТ Р52627–2006

Ключевые слова: болты, винты, шпильки, механические свойства.

Key words: bolts, screws, studs, mechanical properties.

Номер пункта	Механические и физические свойства			Класс прочности										
				3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8[a] $d \le 16$[c] мм	8.8[a] $d > 16$[c] мм	9.8[b]	10.9	12.9
1	Номинальный предел прочности на растяжение $R_{m,\ nom}$, Н/мм^2			300	400		500		600	800	800	900	1000	1200
2	Минимальный предел прочности на растяжение $R_{m,\ min}$[d,e], Н/мм^2			300	400	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220
3	Твердость по Виккерсу, HV, $F \ge 98$ Н	не менее		95	120	130	155	160	190	250	255	290	320	385
		не более		220′					250	320	335	360	380	435
4	Твердость по Бринеллю, HB, $F = 30\ D^2$	не менее		90	114	124	147	152	181	238	242	276	304	366
		не более		209′					238	304	318	342	361	414
5	Твердость по Роквеллу, HR	не менее	HRB	52	67	71	79	82	89	–	–	–	–	–
			HRC	–	–	–	–	–	–	22	23	28	32	39
		не более	HRB	95,0′					99,5	–	–	–	–	–
			HRC	–					–	32	34	37	39	44
6	Твердость поверхности, HV 0,3, не более			–						–[g]				
7	Предел текучести R_{eL}[h], Н/мм^2	номин.		180	240	320	300	400	480	–	–	–	–	–
		не менее		190	240	340	300	420	480	–	–	–	–	–
8	Условный предел текучести $R_{p0,2}$[1], Н/мм^2	номин.		–					–	640	640	720	900	1080
		не менее		–					–	640	660	720	940	1100
9	Напряжение от пробной нагрузки	S_p/R_{eL} или $S_p/R_{p0,2}$		0,94	0,94	0,91	0,93	0,90	0,92	0,91	0,91	0,90	0,88	0,88
		S_p, Н/мм^2		180	225	310	280	380	440	580	600	650	830	970
10	Разрушающий крутящий момент M_B, Н·м, не менее			–						См. ИСО 898-7 [1]				
11	Относительное удлинение после разрыва A, %, не менее			25	22	–	20	–	–	12	12	10	9	8
12	Относительное сужение после разрыва Z, %, не менее			–						52		48	48	44
13	Предел прочности при растяжении на косой шайбе[e]			Значения для полноразмерных болтов и винтов (не шпилек) должны быть не меньше минимальных значений предела прочности на растяжение, приведенных в п. 2										

Номер пункта	Механические и физические свойства	Класс прочности										
		3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8[a]		9.8[b]	10.9	12.9
								$d \le 16$[c] мм	$d > 16$[c] мм			
14	Ударная вязкость *KU*, Дж, не менее	–			25	–		30	30	25	20	15
15	Прочность соединения головки со стержнем при ударе молотком	Без разрушений										
16	Минимальная высота необезуглероженной зоны резьбы, *E*, мм	–						$\frac{1}{2} H_1$			$\frac{2}{3} H_1$	$\frac{3}{4} H_1$
	Максимальная глубина полного обезуглероживания *G*, мм	–						0,015				
17	Твердость после повторного отпуска	–						Уменьшение твердости не более 20 HV				
18	Дефекты поверхности	В соответствии с ГОСТ 1759.2										

[a] Для болтов класса прочности 8.8 диаметром $d \le 16$ мм существует повышенный риск повреждения гайки в случае чрезмерной затяжки, приводящей к тому, что создаваемая нагрузка превосходит пробную нагрузку для гайки, установленную в ГОСТ Р 52628.

[b] Распространяется только на изделия с номинальным диаметром резьбы $d \le 16$ мм.

[c] Для строительных болтовых соединений предельное значение равно 12 мм.

[d] Минимальный предел прочности на растяжение распространяется на изделия с номинальной длиной $l \ge 2{,}5\,d$. Минимальная твердость распространяется на изделия длиной $l < 2{,}5\,d$ и другие изделия, которые не могут быть испытаны на растяжение (например, из-за формы головки).

[e] При испытании полноразмерных болтов, винтов и шпилек минимальные разрушающие нагрузки, используемые для определения предела прочности R_m, должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 6 и 8 ГОСТ Р52627–2006.

[f] Значения твердости, измеренные на конце болтов, винтов и шпилек, должны быть не более 250 HV, 238 HB или 99,5 HRB.

[g] Твердость поверхности не должна превышать более чем на 30 единиц по Виккерсу измеренную твердость сердцевины. Измерения твердости на поверхности и в сердцевине проводят при HV 0,3. Для класса прочности 10.9 любое превышение твердости, приводящее к тому, что твердость поверхности оказывается более 390 HV, не допускается.

[h] В случаях, когда невозможно определить текучести R_{eL}, допускается измерение условного предела текучести $R_{p0,2}$. Для классов прочности 4.8, 5.8 и 6.8 значения R_{eL} приведены только для использования в расчетах и не подлежат контролю при испытаниях.

[l] Предел текучести R_{eL}, соответствующий обозначению класса прочности, и условный предел текучести $R_{p0,2}$ относятся к обработанным испытательным образцам. Эти значения, если они получены при испытаниях полноразмерных болтов, винтов и шпилек, могут отличаться от заданных в зависимости от технологии изготовления и размеров.

ООО "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; tsmm@mashin.ru http://www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.
Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 04.06.09 г. Подписано в печать 10.08.09 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 6,98. Заказ 594. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.