

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

2

2013

(151)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

- Макушин А.А.** Технологические схемы сборки изделий автомобильной техники 3
- Кузнецова С.В., Симаков А.Л.** Фазовые портреты относительного и углового совмещения деталей при автоматизированной сборке 12
- Медведев А.М., Мылов Г.В.** Эволюция технологий электрических межсоединений в электронном приборостроении 20

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

- Челпанов И.Б., Кочетков А.В.** Нормирование точностных характеристик промышленных роботов 29

В помощь конструктору, технологу

- Герасин А.А., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Зюков М.М.** Имитационная модель электромеханических преобразователей энергии с учетом процессов в подшипниковых опорах 35

Информация

- Иванов А.Н.** MASHEX-2012 40

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет

МОСКВА	А.И. КУМЕНКО
А.С. ВАСИЛЬЕВ	А.В. МЕДАРЬ
(главный редактор)	Е.А. МИКРИН
А.А. ГУСЕВ	В.В. ПОРОШИН
М.В. ВАРТАНОВ	Б.В. ШАНДРОВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ	А.А. ШАТИЛОВ
И.Н. ЗИНИНА	А.Г. ХОЛОДКОВА
Ю.Л. ИВАНОВ	Г.А. ЯРКОВ
Ю.Г. КОЗЫРЕВ	

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД	ОРЕНБУРГ
Н.А. ПЕЛИПЕНКО	А.Н. ПОЛЯКОВ
БРЯНСК	А.И. СЕРДЮК
О.А. ГОРЛЕНКО	А.П. ФОТ
ВЛАДИВОСТОК	РЫБИНСК
Ю.Н. КУЛЬЧИН	В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
А.А. СУПОНЯ	В.В. НЕПОМИЛУЕВ
В.М. КОРНИЧЕНКО	А.Н. СЕМЕНОВ
ВОЛГОГРАД	САМАРА
В.Г. КАРАБАНЬ	М.А. ЕВДОКИМОВ
М.Г. КРИСТАЛЬ	Ю.А. ВАШУКОВ
В.И. ЛЫСАК	Г.А. КУЛАКОВ
В.М. ТРУХАНОВ	В.А. НИКОЛАЕВ
ИЖЕВСК	САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
И.В. АБРАМОВ	В.Ф. КУЗЬМИН
Б.А. ЯКИМОВИЧ	Е.В. ШАЛОБАЕВ
В.Г. ОСЕТРОВ	ТОЛЬЯТТИ
КАЗАНЬ	А.И. РЫЖКОВ
Р.И. АДГАМОВ	ТУЛА
КОВРОВ	В.В. ПРЕЙС
Ю.З. ЖИТНИКОВ	ХАБАРОВСК
КОЛОМНА	В.А. ЛАШКО
Ю.Д. АМИРОВ	
КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ	
Б.Н. МАРЬИН	
В.И. ШПОРТ	
А.М. ШПИЛЕВ	

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ	Украина
С.В. ДМИТРИЕВ	КИЕВ
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ	А.С. ЗЕНКИН
НИЖНИЙ НОВГОРОД	В.А. МАТВИЕНКО
С.В. ГОЛУБЕВ	ДОНЕЦК
ОМСК	А.Н. МИХАЙЛОВ
В.Н. КОСТЮКОВ	СЕВАСТОПОЛЬ
ОРЕЛ	Е.Л. ПЕРВУХИНА
Ю.С. СТЕПАНОВ	
Г.А. ХАРЛАМОВ	

БЕЛАРУСЬ
МИНСК
В.Л. БАСИНЮК
М.Л. ХЕЙФЕЦ
ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ
ИЗРАИЛЬ
В.М. БЕДРИН
ПОЛЬША
П. ЛЕБКОВСКИ
Е. ЛУНАРСКИ

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

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

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
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.

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

2 2013
(151)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Makushin A.A. Technological schemes of assembling of parts of automobily techniques 3

Kyznetsova S.V., Simakov A.L. Phase portraits of relative and angular overlapping of the details at the automated assembly 12

Medvedev A.M., Mylov G.V. The evolution of technology of electrical interconnection in electronic manufacturing 20

Quality assurance. Testing. Monitoring

Chelpanov I.B., Kochetkov A.V. Rationing of characteristics of accuracy of industrial robots 29

Industrial and design engineer's aid

Gerasin A.A., Ismagilov F.R., Khairullin I.H., Vavilov V.E., Zyukov M.M. Simulation model electromechanical energy converters within a context of a bearing arrangement 35

Information

Ivanov A.N. MASHEX-2012 40

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

Editors

MOSCOW

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

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

Regional editors

BELGOROD

N.A. PELIPENKO

BRIANSK

O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK

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

VOVGORAD

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

IZNEVSK

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

KAZAN

R.I. ADGAMOV

KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

KOLOMNA

Yu.D. AMIROV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN
V.I. SCHPORT
A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELNY

S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

OMSK

V.N. KOSTIUKOV

OREL

Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

ORENBURG

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

RYBINSK

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

SAMARA

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

ST.-PETERSBURG

V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV

TULA

V.V. PREYS

TOLIATI

A.I. RYZHKOV

KHABAROVSK

V.A. LASHKO

Ukraine

KIEV

A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK

A.N. MIKHAILOV

SEVASTOPOL

E.L. PERVUKHINA

Belarus

MINSK

V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ

GOMEL

V.E. STARZHINSKI

ISRAEL

V.M. BEDRIN

POLAND

P.LEBKOVSKI
E. LUNARSKI

Executive editors of current issue:

Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

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

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
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.

УДК 621.001.673

А.А. Макушин, канд. техн. наук (Камская государственная инженерно-экономическая академия, г. Набережные Челны)
E-mail: alma9497@mail.ru

Технологические схемы сборки изделий автомобильной техники

На основании опыта работы предприятий автомобильной индустрии КамАЗ, ГАЗ, ЕлАЗ и зарубежных предприятий дан анализ особенностей технологических схем сборочного производства.

Which basis on experience of work automobile industry enterprises KamAZ, GAZ, ElAZ and foreign enterprises is given the analysis of features of technological schemes of assembly manufacture.

Ключевые слова: сборка легковых автомобилей и грузовиков, технология сборки, технологические оснастка и оборудование, обеспечение качества.

Keywords: assembly cars and trucks, assembly technology, production tools and equipment, quality assurance.

Рыночные условия и необходимость удовлетворения запросов потребителей ставят задачу непрерывного увеличения номенклатуры моделей и модификаций автомобилей и изделий автомобильной техники, что требует разработки и претворения в жизнь мероприятий по интенсификации сборочного процесса.

Технологическая подготовка сборочного производства включает в себя:

- разработку технологических процессов;
- обоснование и проектирование технологических схем сборки;
- конструирование и изготовление специальной оснастки, нестандартного оборудования;
- выполнение необходимых расчетов и планировок.

Исходной и первоочередной частью технологической подготовки сборочного производства (ТП СП) является проектирование технологических процессов сборки. Особенности технологических процессов сборки изделий автомобильной техники изложены в работе [3].

Технологическая схема сборки определяет последовательность, содержание и порядок выполнения технологических операций сборки автомобилей, двигателей, агрегатов и их узлов, планировочное расположение сборочного агрегата (линии) с учетом меж-

операционного накопления собираемых узлов на различных стадиях сборки, зон ремонта (исправления дефектов). Технологическая схема должна включать схему питания сборочных позиций комплектующими деталями, узлами и т.д.

При разработке схемы сборки необходимо учитывать:

- число деталей и узлов, входящих в изделие;
- годовую программу выпуска;
- массу изделия;
- экономическую целесообразность механизации и автоматизации;
- согласование размеров и их предельных отклонений, взаимного расположения поверхностей деталей и узлов;
- целесообразность сборки изделия (узла) в едином потоке или с его разделением на несколько самостоятельных процессов.

Конечной целью разработки схемы сборки является выбор вида сборочного оборудования, наиболее приемлемого для данного конкретного случая. Как правило, разработка и внедрение технологии и оборудования для сборки ведется в такой последовательности:

- технологический анализ собираемого узла (изделия);
- разработка процесса сборки;
- составление схемы сборки и задания на проектирование оборудования;
- конструкторский анализ изделия и процесса сборки;
- разработка технического проекта оборудования;
- выполнение рабочего проекта оборудования.

На всех этапах требуется глубокий анализ технологии сборки собираемого изделия, конструкции оборудования для сборки. Технологический анализ проводится, как правило, еще на стадии создания конструкции и имеет своей целью повышение технологичности конструкции за счет сокращения числа и номенклатуры оригинальных деталей, исключения мест, неудобных для выполнения сборочных операций.



При выборе и проектировании схемы сборки необходимо учитывать категорию сборочного производства. Технологические процессы сборочного производства автомобилей разделяют на две основные категории – SKD и SKD. Литеры KD означают Knocked Down, т.е. "разобранный", а первая буква характеризует степень "разборки" машинокомплекта. Самая сложная технология – SKD (Completely Knocked Down) – сборка "полностью разобранных" машинокомплектов. Это полноценное производство, которое сейчас уже многие десятилетия функционирует на заводах отечественных и зарубежных автомобилестроительных корпораций.

Другая группа технологических процессов сборочного производства – SKD (Semi Knocked Down), т.е. сборка "частично разобранных" автомобилей. В свою очередь, принято различать четыре разных градации SKD по сложности. Самая простая технология SKD – 0, которую иногда еще называют DKD (Disassembled Knock Down): с уже готового автомобиля снимают (или не устанавливают) двигатель, коробку перемены передач, подвеску и некоторые более мелкие узлы (зеркала, фары, бамперы и т.д.), чтобы провести через таможню в качестве машинокомплекта.

Технологии SKD 1, 2 и 3 предусматривают увеличение числа операций на сборочном производстве, а наиболее "продвинутой" уровень – это мелкоузловая сборка SKD 4, которую также именуют MKD (Medium Knocked Down), что означает "наполовину разобранный".

В этом случае на завод приходят каркасы окрашенных кузовов и полный набор комплектующих. Конечно, сборка автомобилей из таких комплектов занимает гораздо больше времени и ресурсов, чем крупноузловая, но в итоге стоимость машины должна оказаться ниже, а степень локализации производства – соответственно, выше.

При разработке процесса и схемы сборки необходимо иметь несколько вариантов, причем выполненных на основе применения различного оборудования, с тем, чтобы путем технико-экономического анализа выбрать оптимальные процесс и схему. В первую очередь разработку нескольких вариантов обязательно проводят при составлении процесса и схемы сборки сложного узла. Необходимо провести анализ возможностей различного сборочного оборудования, так как это во многом поможет создать оптимальную схему сборки. В автомобилестроении применяют следующие виды сборочного оборудования: стенды; сборочные устройства; одно- и многопозиционные автоматы (полуавтоматы); поточно-механизированные сборочные линии, автоматизированные сборочные линии.

Сборочный стенд содержит стол с установленными на нем одним или несколькими приспособлениями

для сборки, гнездами или тарой для хранения мелких деталей. Стенд может быть оснащен ручным или механизированным инструментом для выполнения различных операций (запрессовки, развальцовки и т.д.). Основным признаком сборочного стенда является большой объем установочных и технологических операций, выполняемых оператором вручную или с применением механизированного инструмента, а также небольшой объем автоматических операций или их отсутствие.

Сборочное устройство содержит станину с закрепленными на ней устройствами для автоматического и ручного выполнения операций, причем доля ручных операций в общей трудоемкости сборки составляет менее 50 %. Такие устройства снабжают транспортными механизмами для автоматического или полуавтоматического перемещения собираемого узла по позициям. Как правило, на таких полуавтоматах вручную выполняют операции установки деталей, наживления крепежа и т.д.

Сборочный автомат содержит станину с закрепленными на ней устройствами для автоматического выполнения операций, а также механизмами для автоматического перемещения собираемого узла, ориентации и подачи комплектующих изделий. Сборочные автоматы применяют, как правило, для автоматической сборки узлов, с небольшой номенклатурой деталей (от 2 до 8 наименований), программа выпуска которых велика (в основном, более 400 тыс. шт. в год). При этом собираемые детали должны иметь небольшие размеры, позволять хорошо их ориентировать при сборке.

Полуавтоматы применяют и при меньших программах выпуска узлов (250...300 тыс. шт. в год). При этом необходима тщательная экономическая оценка уровня автоматизации. Как правило, в таких полуавтоматах автоматизируются завертывание резьбовых деталей и запрессовка.

Поточно-механизированная сборочная линия (ПМЛ) включает в себя конвейер для перемещения собираемого изделия по позициям, комплекс подъемно-транспортного оборудования для установки деталей при сборке, механизированный и ручной инструмент для выполнения операций. Основные операции по установке и сборке операторы выполняют на ПМЛ вручную или с применением приспособлений и инструмента.

Автоматизированная сборочная линия (АСЛ) представляет собой поточную линию, состоящую из транспортной системы для перемещения собираемого изделия по позициям ручной и автоматической сборки, автоматических механизмов для выполнения установочных и технологических операций, а также позиций для выполнения ручных и механизированных операций.



Сборочные станды в крупносерийном и массовом производствах применяют при сборке небольших по размерам узлов и незначительной трудоемкости технологического процесса, когда программа выпуска узлов относительно невелика (до 200 тыс. шт. в год). Их применяют также при сборке средних и крупных узлов с малым числом деталей (5...10), когда автоматическая ориентация базовых и других деталей достаточно сложна и наиболее целесообразно сборку осуществлять на стационарной позиции. При проектировании оборудования для сборки мелких узлов необходимо оценивать возможность их сборки на сборочных стандах. Для предварительного выбора технологической и конструктивной схем сборки на базе сборочных стандов и полуавтоматов необходимо учитывать, что автоматы применяют для сборки изделий с годовой программой выпуска более 450 тыс. шт. в год. Необходимым условием такой сборки является высокая точность изготовления собираемых деталей и их хорошее качество. Детали должны автоматически надежно ориентироваться. Если какую-то часть операций невозможно автоматизировать обычным способом, сборку, как правило, необходимо выполнять на полуавтоматах. При этом особое внимание необходимо обратить на связь автоматических позиций сборки с ручными. Необходимо дать возможность оператору работать с несколькими изделиями одновременно, что освободит его от однообразного вида технологических операций.

Несмотря на относительно высокий уровень механизации и автоматизации сборочных работ в промышленности, в автомобилестроении значительный объем сборки производится на ПМЛ (сборка автомобиля, двигателя, агрегатов, мостов, рам и т.д.). Транспортным средством для перемещения собираемых изделий на ПМЛ является *конвейер*, обеспечивающий перемещение собираемых изделий с заданным ритмом. Движение конвейера может быть пульсирующим или непрерывным.

Когда в конвейер встраивают какие-либо стационарные установки или механизмы (например, сборочный станд и т.д.), ритм работы конвейера – пульсирующий. В большинстве случаев применяют пульсирующие конвейеры с синхронным ритмом движения. В синхронных линиях перемещение собираемых изделий между позициями выполняется с заданным тактом на определенный постоянный шаг.

В автомобилестроении имеет место создание и несинхронных сборочных линий. Условие соблюдения заданного такта в несинхронных линиях не выполняется. На одной позиции может выполняться технологическая операция, на другой изделие может перемещаться на позицию или удаляться с нее. В зависимости от накопления изделий в зоне микрораздела перед технологической позицией изделие может останавли-

ваться на разных расстояниях от позиции, т.е. шаг ее перемещений переменный. В работе [1] дан обзор транспортных систем несинхронных сборочных линий.

По своей конструкции конвейеры не дают возможности широкой автоматизации сборочных операций, все сборочные операции сборщики осуществляют вручную или с применением механизированного инструмента. Технологическая схема, в которой для сборки сложных и громоздких узлов применяют ПМЛ, значительно проще для реализации и имеет намного меньшую стоимость, чем автоматизированные сборочные линии. Так, для ПМЛ сборки мостов, балок, тормозных механизмов требуются транспортный тележечный конвейер со сборочными стойками, механизированный инструмент для резборазвертывания, средства подвески механизированного инструмента, грузоподъемные средства для установки тяжелых деталей и узлов на собираемые изделия. Подача крупных узлов и деталей осуществляется к месту сборки с помощью опускных секций подвесного толкающего конвейера.

Технологическая схема ПМЛ определяет ее компоновку. Применяют ПМЛ на базе напольных и подвесных конвейеров. Для сборки крупных узлов и автомобилей применяют прямоочные линии на базе стоечных конвейеров, у которых выше уровня пола выступают только стойки (опоры), а на них устанавливают базовую деталь собираемого узла. Такие конвейеры обеспечивают удобный доступ к собираемому изделию со всех сторон.

Пластинчатые и тележечные конвейеры применяют для сборки средних и небольших узлов. Такие конвейеры ограничивают доступ к собираемому изделию, так как рама не дает возможности для подхода к передней и задней, по ходу конвейера, сторонам собираемого изделия. Поэтому там, где такой подход требуется, следует использовать приспособления, позволяющие поворачивать собираемый узел в удобное для работы положение. Однако применение таких приспособлений не обеспечивает требуемого доступа к зонам сборки, так как в ряде случаев на одной сборочной позиции требуется одновременный подход к двум, а иногда и трем сторонам собираемого узла.

Подвесные толкающие конвейеры (ПТК) применяют для сборки кабины, кузова, сидений. Сборка на ПТК позволяет обеспечить удобный доступ к собираемому узлу со всех сторон, дает возможность регулировать положение собираемого узла по высоте, обеспечивает возможность бесперегрузочного накопления собираемых узлов перед позициями, отвод собираемых и собранных узлов для устранения несоответствий, испытания и других операций.



В работе [5] даны подробные рекомендации по проектированию подвесных толкающих конвейеров: выбору скорости транспортировки, типа конвейера, привода на основании тягового расчета, а также определена последовательность проектирования.

Подвесные толкающие конвейеры отличаются большим разнообразием конструкций. В автомобилестроении находят применение ПТК с опускающимися секциями. В работе [6] приведены описания различных конструкций опускающихся секций ПТК, их основных узлов, механизмов и приборов, даны кинематические схемы, технические характеристики.

Технологические схемы сборки в значительной степени определяют ее организационные формы. Так, например, подвесные толкающие конвейеры (ПТК) открыли новые пути [3] совершенствования организационных форм сборки. Появилась возможность при сборке изделия на подвеске конвейера при непрерывном движении конвейерной цепи останавливать изделие на сборочной позиции, передавать его на другой конвейер, образуя при этом мегаоперационные заделы, ветвить конвейер, создавая параллельные потоки сборки, изменяя на отдельных операциях такт сборки. Стало возможным создание комплексных сборочных производств. Так, собранный на линиях сборки-сварки кузов легкового автомобиля с помощью системы ПТК после выполнения всех подготовительных, окрасочных и транспортных операций проходил все операции контроля и сборки кузова, а затем на этой же подвеске поступал на общую сборку автомобиля.

Сборка легкового автомобиля на подвеске ПТК позволяет устанавливать двигатель и агрегаты трансмиссии снизу, что упрощает выполнение сборочных операций и снижает их трудоемкость.

Резервы развития ПМЛ, ПТК заложены в принципиально новых решениях технологических схем, например, схеме сборки и испытания двигателя на ПТК. На каждой подвеске установлены по десять соединительных узлов, которыми двигатель соединяется с испытательным стендом. Подвеска из заготовительного склада выходит на участок сборки (грузовой монорельс). Таких параллельных участков может быть неограниченное число, которое зависит от программы выпуска изделий. В конце сборки участки соединяются в конвейер готовых изделий.

Работа осуществляется следующим образом. Подвеска поступает на участок сборки, где накапливается четыре подвески. Рабочий ведет сборку сразу четырех двигателей механизированным инструментом со сменными насадками. Детали двигателя находятся на накопителе, который установлен на рельсы рядом со сборочным конвейером. Накопители питаются с подвесок, которые поступают на запасной конвейер. Со-

бранные двигатели передают на участок регулировки и испытания и далее на конвейер готовых двигателей.

Ранее при сборке на традиционной ПМЛ на одного рабочего собиралось 11 двигателей в смену, а по приведенной технологии – 16...18. После сборки двигатели перемещают на накопитель и далее на испытательный стенд, где рабочий проводит испытания. Такая схема сборки имеет преимущества перед традиционной: снижается монотонность работы, так как увеличивается число выполняемых операций; возрастает качество сборки, так как каждая бригада из трех человек имеет свое клеймо и появляется персональная ответственность за каждый собранный двигатель; повышается производительность труда за счет разделения участков работы на отдельные потоки.

Технологическую и конструктивную схему сборочной линии выбирают на стадии технического предложения – это одна из наиболее сложных и ответственных задач. На этой стадии необходимо разработать процесс сборки, определить места контрольных операций, выявить способы достижения требуемой производительности линии, операции автоматической и ручной сборки, определить метод транспортировки узла, принципиальную конструкцию транспорта и сборочных агрегатов, необходимость и места установки ремонтных и накопительных участков.

Современное производство характеризуется высоким уровнем автоматизации процессов изготовления деталей и недостаточным уровнем автоматизации сборки. Конструкции машин, изготавливаемых в настоящее время, разрабатывались без учета автоматизации сборки. Так как конструкция работающих линий механической обработки, как правило, не предусматривает возможности переналадки и предназначена для выполнения строго определенных операций в заданной последовательности, ряд требований технологии автоматической сборки не может быть выполнен без значительных затрат.

В связи с этим приходится проектировать и изготавливать сборочные линии с определенным числом ручных операций. Кроме того, еще не на все сборочные операции разработаны типовые решения сборочных агрегатов с необходимым набором стандартных и унифицированных узлов, а создание для отдельной операции специальной конструкции агрегата, как правило, экономически нецелесообразно. Однако окончательно разработанным процесс можно считать только после решения всех принципиальных вопросов конструкции линии, так как она часто предъявляет свои требования к технологии.

Для разработки общей технологии и конструкции сборочной линии в первую очередь необходимо выбрать рациональное положение собираемого узла на



конвейере, которое определяется положением базовой детали или базовой группы, т.е. сборочной единицы, определяющей положение остальных сборочных единиц узла. Установка узла на конвейере должна обеспечивать возможность его надежного транспортирования от одной позиции к другой и базирования на этих позициях с заданной степенью точности при удобном для сборки положении узла. Узел может быть установлен на конвейере или на приспособлении-спутнике. Спутник изготавливается с высокой точностью. Кроме того, применение спутников при некоторых видах компоновки линии требует наличия возвратной ветви и подъемных столов, что также усложняет и удорожает линию.

Предпочтительно непосредственное транспортирование узла, если конструкция базовой детали это позволяет. В зависимости от формы, размеров и взаимного положения поверхностей узла, а также изменения этих факторов по мере сборки узла конвейер может быть шаговым или непрерывно перемещающим (роликовым, цепным, ленточным и т.д.). Чтобы положение узла при транспортировании шаговым конвейером было устойчивым, необходимо наличие участков поверхности узла, опора на которые даст устойчивое равновесие, а также элементов, предупреждающих перекосы и смещение узлов. При базировании корпусных деталей узлов на конвейере и рабочих позициях сборочных линий зачастую используют такие базовые элементы, как приливы и отверстия, на которых базируются детали при механической обработке.

На роликовом накопительном конвейере можно перемещать узлы, имеющие базовые плоскости длиной больше удвоенного расстояния между соседними роликами. Для перемещения узлов на транспортирующих элементах, проскальзывающих относительно принудительно останавливаемых узлов, на базовых плоскостях таких узлов должны быть заходные фаски. Необходимо учитывать, что положение узла при сборке во многом влияет на удобство работы сборщиков и рациональной компоновки сборочных агрегатов. При этом число переустановок узла должно быть минимальным.

При разработке схемы сборки необходимо обеспечить отсутствие неудобных установочных операций. Так, при сборке снизу установка агрегатов и контрольных устройств под конвейером затрудняет доступ к ним при обслуживании, налагает ряд условий по встраиваемости агрегатов, что, в свою очередь, затрудняет применение унифицированных конструкций.

Способ базирования узла во время сборки может меняться в зависимости от необходимого положения узла, смены баз при установке деталей. Кроме того,

налагается ряд дополнительных требований, определяемых конструкцией изделия.

Характерным примером перебазирования узла при сборке может служить сборка двигателя. Блок цилиндров перемещается штанговым конвейером по роликам. По мере сборки двигатель несколько раз кантуется и после того, как имеющиеся базы закрываются устанавливаемыми узлами и деталями, он устанавливается на спутник, на котором производится окончательная сборка. После выбора конструкции конвейера и способа установки узла на него необходимо определить принципиальную компоновку линии.

Большая часть сборочных операций может быть разработана с помощью типовых технических решений. Даже применяя типовые решения, каждое рабочее место нужно рассматривать отдельно. Необходимо учитывать также вопросы охраны труда и безопасности.

Наиболее целесообразно использовать механизацию и рассматривать возможность автоматизировать резьбозавертывающие, запрессовочные, установочные, смазывающие, контрольные и испытательные операции. Решение об автоматизации той или иной операции необходимо принимать одновременно с расстановкой операторов на линии, так как она значительно влияет на экономические факторы.

В автомобилестроении существует ряд принципиальных компоновочных схем сборочных линий. Наиболее крупные узлы с большой номенклатурой устанавливаемых деталей и сборочных единиц собирают на линиях с прямолинейной компоновкой конвейеров. При сборке на спутнике возвратный конвейер располагается под основным сборочным. К достоинством такой компоновки относят хороший доступ к линии, возможность вести сборку с двух сторон без установки механизмов поворота изделия, максимально упрощенный привод конвейера, рациональную расстановку значительного количества тары с комплектующими изделиями. Наиболее крупные агрегаты автомобиля, требующие установки большого числа крупногабаритных комплектующих изделий, собирают на линиях с прямолинейной компоновкой.

При транспортировании узла на спутнике возникает необходимость иметь возвратную ветвь конвейера, которая проходит под сборочным конвейером, что значительно удорожает и усложняет конструкцию. При значительных размерах собираемого узла и трудоемкости большая длина линии затрудняет компоновку цеха, перекрывая транспортные потоки. Кроме того, установка такой линии предъявляет определенные требования к размерам производственного здания.

Горизонтально замкнутую компоновку линии применяют, как правило, при сборке узлов с небольшими размерами и малым числом или размерами комплектующих изделий. На линиях с такой компо-



новкой собирают такие узлы двигателя, как головка блока цилиндров, картер маховика, впускные коллекторы, краны пневмо- и гидросистемы автомобиля и т.д. К преимуществам такой компоновки относят возможность сборки изделия с четырех сторон на различных участках линии и отсутствие возвратных участков при сборке на спутниках; к недостаткам — затрудненность использования площади внутри замкнутого пространства линии; затрудненную сборку изделия одновременно с двух сторон. Однако при малых размерах линий эти недостатки сказываются незначительно.

На многих заводах имеют место случаи, когда программа сборки того или иного узла неоптимальна для частичной или полной автоматизации сборки, например, если в сборочном цехе собирают 50 узлов и при анализе сборки каждого узла выявлено, что трудоемкость сборки такова, что требует для выполнения программы не более двух человек. Применение специального полуавтомата или автомата для сборки каждого такого узла нецелесообразно, так как его загрузка не будет превышать 20 %, а стоимость такого автомата или полуавтомата такова, что окупаемость его равна 8...12 годам, т.е. значительно дольше, чем рекомендуемые нормативные сроки окупаемости. Сборка любого из этих узлов включает установочные операции и один-два вида операций (запрессовку, расклепку, заворачивание).

Применяя для выполнения операций универсальный транспорт и оборудование (прессы, резьбозакрывающие машины со специальной оснасткой) можно добиться того, что на сборочной линии будут собирать узлы пяти-восемью наименований. Такие линии дают возможность находить рациональные решения сборки при сравнительно небольших программах выпуска изделий.

В автомобилестроении находит распространение групповая сборка, которая осуществляется партиями. Размеры партий должны определяться исходя из требований производства с учетом времени на подготовку сборки, времени от начала сборки узла и до выхода готового узла. В ряде случаев на линии можно одновременно собирать два и более узлов. Когда число узлов, которые можно собирать на линии, ограничивается возможностями спутников, их можно расширить за счет установки дополнительных комплектов спутников.

Линия групповой сборки мелких узлов представляет собой горизонтально замкнутую транспортную систему, состоящую из двух параллельных роликовых накопительных конвейеров, соединенных жесткими перемишками. Сборка производится на спутниках, которые по перемишкам перемещаются сталкивателями (ход сталкивателя равен длине спутника).

Опыт работы линий групповой сборки позволил выявить основные принципы построения таких линий. Линия должна быть горизонтально замкнутой. На линиях групповой сборки мелких узлов сборку практически всегда можно организовать так, чтобы она велась или сверху, или с наружной стороны конвейера.

Стороны линии должны компоноваться из унифицированных секций роликового накопительного или шагового конвейера. Эти участки роликового конвейера работают несинхронно, поэтому на них по возможности должны выполняться все ручные операции, что позволяет рабочему работать, не подчиняясь строгому ритму линии. На участках с жесткими направляющими должны выполняться все силовые операции. В большинстве линий на этих участках устанавливают стандартные прессы или заворачивающие устройства.

Первоочередная задача после выбора принципиальной компоновочной схемы сборочной линии — контроль и исправление дефектов сборки. Необходимо организовать сборку так, чтобы без контроля не совершалась ни одна операция.

Возможны два принципиально отличающихся варианта устранения выявленных несоответствий (ремонта) изделий. При обнаружении дефекта узел снимается с линии. На участке, расположенном около линии, производят устранение дефекта и окончательную сборку. Таким образом, можно ремонтировать узлы с незначительными массами, размерами и трудоемкостью сборки. Причем удалять с конвейера линии узел можно не сразу после обнаружения дефекта, а после выполнения ряда последующих операций, которые не затрудняют исправления дефекта и не увеличивают трудоемкости ремонта. Таким образом, проанализировав процесс сборки, можно организовать минимальное число мест съема дефектных узлов не после каждой операции, а после групп операций. Кроме упрощения конструкции линии, такая группировка позволит свести до минимума число ручных операций сборки на ремонтном участке.

При сборке сложных и крупногабаритных узлов, таких как головка блока цилиндров, исправление дефектов необходимо производить, не снимая узлов с конвейера линии. Для этого организуют ремонтно-накопительные участки. По аналогичной схеме движения потока организованы ремонтно-накопительные участки линий сборки коробки перемены передач и головки блока цилиндров. Размеры ремонтных участков необходимо выбирать с учетом времени максимального объема ремонта узла и возможного процента брака на линии. Таким обра-



зом, линия будет работать без остановок из-за переполнения ремонтных участков.

После решения вопросов ремонта узлов необходимо определить места и объемы межоперационного накопления. Объем межоперационного накопления в сборочных линиях, как правило, значительно уступает объему накопления в линиях механической обработки. Это объясняется тем, что в линиях обработки накопление нужно не только для компенсации отклонений времени выполнения отдельных циклов, как это предусматривается в линиях сборки, но и для смены инструмента, а также выполнения мелких регламентных работ.

В линиях сборки на объем накопления оказывает влияние производительность линии, трудоемкость сборки узла на отдельных операциях, размеры изделия, число рабочих мест, производительные площади, имеющиеся для линии, количество тары с деталями. Поэтому при составлении планировки линии необходимо одновременно учитывать потоки движения деталей, механизацию подачи деталей и сборочных единиц на сборку и расстановку тары. При сборке крупногабаритных и массовых узлов подача комплектующих изделий на линию оказывает значительное влияние на схему и планировку линии.

Подача большинства базовых деталей и сборочных групп на сборку осуществляется ПТК. Это позволяет создать значительное межлинейное накопление без дополнительных производственных площадей, организовать рациональную технологическую планировку линии и конструктивную ее компоновку. После выбора компоновочной схемы сборочной линии необходимо определить типы конвейеров, из которых должен быть скомпонован транспорт линии. При наличии хороших баз для перемещения узла без спутника конвейер может быть роликовым накопительным, подъемно-перемещающим или штанговым флажковым. Другие виды транспорта применяют в исключительных случаях.

Роликовые накопительные конвейеры широко применяют в линиях механической обработки и сборки. Главным отличием такого конвейера является наличие износоустойчивой втулки между приводным валом и гильзой ролика. При принудительной остановке изделия вращение гильзы прекращается. Вал скользит по втулке, как в подшипнике. В сборочных линиях при транспортировании изделия без спутников роликовый накопительный конвейер применяют в качестве межоперационного накопителя и на участках с преобладанием ручной сборки, где он позволяет работать каждому рабочему с заданной производительностью, не выдерживая строго время отдельного цикла, т.е. выполняет роль накопителя. При этом неритмичность работы операторов не сказывается на производительности

каждого из них. Необходимо учитывать, что установка большей части сборочных автоматических агрегатов, особенно работающих со значительными нагрузками, например, запрессовочных, на роликовом конвейере затруднена, так как требует установки отсекаелей, фиксаторов и подводимых при запрессовке опор.

Подъемно-перемещающие конвейеры применяют в основном при автоматической сборке, при этом изделие лежит на поверхности, нарушение шероховатости которой не допускается. Например, на них перемещается головка блока цилиндров по присоединительной поверхности. Применение такого конвейера на участках ручной сборки нежелательно, так как он не обладает свойствами накопителя и требует четкого выполнения цикла в каждом звене линии. Кроме того, он не отвечает требованиям правил безопасности для ручной сборки. На автоматических сборочных позициях такой конвейер хорошо выдерживает вертикальные нагрузки, так как изделие устанавливается на неподвижные базирующие поверхности. При этом точность установки выше, чем при любом другом виде транспортирования.

На участках с ручной и автоматической сборкой часто устанавливают *штанговый флажковый конвейер*. Он отвечает требованиям правил безопасности для ручной сборки и имеет высокую жесткость, что позволяет выполнять на нем прессовые операции без подводимых опор и обеспечивает высокую точность установки изделия на сборочных позициях.

При перемещении изделия на спутнике, кроме перечисленных видов транспортирования, применяют *цепные конвейеры* различной компоновки. В линиях сборки узлов двигателя, таких как линии сборки впускных коллекторов, гидромфты вентилятора устанавливают цепной конвейер, в котором две параллельные цепи замкнуты в горизонтальной плоскости. Спутник перемещается по шлифованным боковым пластинам цепи. Нижняя плоскость спутника и поверхность пластин изготовлены из износоустойчивого металла и термически обработаны. При вынужденной остановке спутника цепь проскальзывает по нижней его плоскости.

При сборке крыльчатки вентилятора и нажимного диска сцепления применяют конвейер, представляющий собой две параллельные направляющие с ведущей цепью между ними. Спутник движется на роликах по вертикально замкнутой траектории. Ведущая звездочка находится в зацеплении с цепью и зафиксирована неподвижно на спутнике. При подходе спутника к рабочей позиции или другому спутнику фиксатор отжимается кулачком, звездочка начинает свободно проворачиваться и спутник останавливается. Прессовая



скоба установлена на направляющих и сбалансирована. Клепка осуществляется специальной головкой.

Компоновка агрегатов линии зависит от ряда факторов. Наиболее часто используется схема, в которой станины агрегатов и линии выполнены раздельно. Такая схема применяется в основном в линиях для сборки тяжелых узлов, когда конвейер должен иметь жесткую раму, а станины агрегатов имеют большие размеры. Поэтому изготовление общей станины для агрегатов и конвейера затруднено.

При автоматической сборке важно определить степень концентрации операций, выполняемых на сборочных позициях. Традиционная система распределения операций по сборочным агрегатам предусматривает узкий набор операций, выполняемых на одной позиции. Примерами таких агрегатов являются многшпиндельные гайковерты для закрепления крышек подшипников, головок блока цилиндров и других деталей в линии сборки двигателей.

Запрессовочные агрегаты обеспечивают запрессовку одной детали или нескольких однотипных. Однако во многих случаях программа выпуска сложных узлов и механизмов является недостаточной для применения автоматизированных линий сборки с большим числом сборочных агрегатов. Тогда при разработке технологической схемы сборки целесообразно изыскать возможность концентрации сборочных операций, что делает экономически целесообразным механизацию и автоматизацию сборки.

Концентрация операций осуществлена и при создании агрегата запрессовки штифтов, маслоподводящих втулок и гильз. Здесь практически без усложнения удалось три агрегата заменить одним. Несмотря на то, что автоматизация сборочных процессов привлекает сейчас все большее внимание, большинство технологических схем сборки строят с учетом значительного участия человека в сборочном процессе.

Это объясняется тем, что детали должны быть поданы на сборку в ориентированном положении и это предъявляет ряд требований к конструкции и точности изготовления деталей. Сборка в отличие от других видов обработки требует подачи на линию большого числа деталей широкой номенклатуры, что требует организации грузопотоков, межоперационных накоплений и складирования.

В связи с этим сборка в настоящее время рассматривается как комплекс проблем, охватывающих технологический цикл от изготовления деталей, поступления комплектующих изделий на склады до выдачи собранных узлов на склад готовой продукции. Например, в Италии линией сборки двигателя (разработана фирмой "Комау индустриаль") управляет центральная ЭВМ. Поступление комплектующих изделий в центральный склад, их перемещения внутри склада, по-

грузки на робототехнические транспортные средства, которые являются основным связующим звеном комплекса, постоянно контролируются. В работу всех звеньев вносят необходимые коррективы, что делает работу комплекса гибкой, хорошо приспособляемой к конкретной ситуации.

Такой сборочный комплекс позволяет выпускать широкую номенклатуру изделий. При этом не требуется создания специальных технологических потоков для каждого из них. Допускается свободная компоновка рабочих мест, что позволяет рационально планировать цехи. Основное транспортное средство — тележка, заменяющая традиционные конвейеры, не требует каких-либо специальных коммуникаций, перекрывающих проезды и загромождающих пространство. При таком транспорте на каждое рабочее место подается изделие только нужной модификации, тогда как на конвейерах мимо каждого рабочего проходят все изделия. При этом рабочий совершенно не связан с общим циклом сборки, допускаются перерывы до 20 мин. Необходимым условием является только соблюдение средней производительности. Маршрутами движения тележек управляют периферийные ЭВМ, которые дают информацию в центральную ЭВМ о накопителях, грузопотоках и состоянии сборки. Таким образом, оперативное управление производством автоматизировано. Необходимую информацию о накоплении собираемых изделий, объемах складирования, ходе сборки на различных участках и неисправностях системы можно получить на центральном пульте.

Линия сборки может быть односекционной или состоять из ряда последовательно соединенных типовых секций, каждая из которых комплектуется из типовых подсистем.

Линия сборки автомобиля фирмы "Фиат" (Италия) занимает 5000 м² производственной площади. На ней применено 32 тележки, которые поступают на пять позиций сборки. Линия построена в следующей последовательности: участок загрузки спутников комплектующими узлами силового агрегата и ходовой части; 12 двойных рабочих позиций ручной сборки; два автоматических накопителя спутников с подсортированными узлами (передача спутника с тележки на накопитель и обратно осуществляется автоматически); пять позиций с автоматическими резьбозавертывающими агрегатами, станция управления с участком программирования.

Работа линии осуществляется следующим образом. Из склада комплектующих изделий поступают узлы в зону загрузки спутников, которые установлены на тележках. Подготовку узлов, их укладку на спутники осуществляют рабочие на позициях ручной сборки. Здесь устанавливают ходовую часть автомобиля,



двигатель. Далее спутники поступают в накопители, а тележка возвращается на исходную позицию. По команде при подаче кузова на сборку спутник с узлами автомобиля соответствующей модификации поступает на тележку второй транспортной системы. Установка и крепление кузова на ходовой части производятся автоматически на пяти параллельно установленных позициях. Здесь спутник снимается с тележки и фиксируется с высокой точностью.

Подъемная секция ПТК опускает кузов, который затем автоматически крепится к ходовой части. Далее спутник перемещается на позицию автоматического контроля, после чего собранный автомобиль опускается на пол, а освободившаяся тележка со спутником отправляется на исходную позицию. Эксплуатация такой линии показала ряд ее преимуществ по сравнению с традиционными: работа людей не связана с ритмом линии (на ручной сборке применяется бригадный метод сборки и при незначительном увеличении трудоемкости сборки устраняется монотонность работы); снизился уровень шума в зоне работы рабочих; улучшились условия безопасности работы; повысились скорости межоперационного перемещения спутников; улучшилась "гибкость" процесса; снизились простои и затраты на циркулирующую неукомплектованных изделий.

Представляет интерес линия сборки коробки перемены передач, работающая на одном из автомобильных заводов Германии. С помощью типовых элементов можно скомпоновать линию сборки любого крупного узла. Базовым элементом линии является каретка с автономным приводом, перемещающаяся по направляющим. Каретка имеет два исполнения: первое — с направляющими посередине для работы сборщиков и автоматических агрегатов с двух сторон, причем собираемый узел может поворачиваться вокруг вертикальной оси, и второе — с консольной установкой тележки.

Для перемещения кареток вдоль линии крепится зубчатая рейка, а на каретке устанавливается электропривод. Каждая каретка оснащена микропроцессором, с помощью которого задаются позиции остановки. Длина каретки 750 мм, шаг кареток — более 850 мм. Продолжительность цикла 10...240 с. Линия сборки коробки перемены передач имеет длину 63 м и на ней установлено 18 сборочных позиций. Минимальный шаг между позициями 3 м. Промежуточные позиции служат для накопления.

Технологические схемы сборки выбирают и проектируют с учетом того, что процессом сборки необходимо управлять с использованием информационных технологий.

Большинство компаний, которые являются лидерами в своих отраслях, признали конкурентоспособ-

ной моделью инновационной реорганизации производства систему Lean Production (бережливого производства). Термин Lean Production был введен для обобщения японских производственных методик, принципов кайдзен (в японской транскрипции) — "непрерывное улучшение" в переводе с японского, канбан — сигнальное управление, это настроенность персонала на сокращение избыточных запасов на этапах производственных маршрутов [4].

Анализ систем управления бережливым производством на предприятиях показывает, что система может быть структурирована по функциям, в том числе и технологической подготовкой производства, реструктуризацией и реконструкцией предприятия на основе создания автоматизированной системы технологической подготовки бережливого производства. Решение рассматриваемой проблемы по упорядочению технологических схем (потоков) в системах Lean Production сводится к классу транспортно-технологических задач.

Оптимизация решений ведет к изменению технологических схем, потоков, структуры и планировки цехов и производственной структуры предприятия. Все эти преобразования технологических схем, производственных и транспортных потоков имеют следствием изменение генерального плана предприятия, планировки его производственных цехов, участков.

Технологические схемы производства, в том числе и сборки автомобилей и изделий автомобильной техники, стратегию и подход Lean Production (бережливое производство) уже реализуют ведущие автомобилестроительные компании Ford, Toyota, Scania, КамАЗ и др.

Библиографический список

1. **Бедрин В.М.** Обзор транспортных систем несинхронных сборочных линий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2001. № 2. С. 22–25.
2. **Бедрин В.М., Ярклов Г.А.** Организационные формы сборки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 11. С. 3–9.
3. **Макушин А.А.** Особенности сборки автомобилей и узлов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 5. С. 30–38.
4. **Технологическая подготовка бережливого производства в машиностроении / С.Г. Селиванов, В.В. Никитин, М.А. Дружинина, В.Г. Шипилова // Экономика и управление в машиностроении. 2010. № 1. С. 6–11**
5. **Федотов Г.М.** Рекомендации по проектированию подвесных толкающих конвейеров сборочных производств // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 2. С. 19–26.
6. **Федотов Г.М.** Опускающиеся секции подвесных толкающих конвейеров в сборочных системах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2003. № 10. С. 2933, № 11. С. 38–43.



УДК 621.757

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

Фазовые портреты относительного и углового совмещения деталей при автоматизированной сборке

Предложен метод анализа способов автоматизированной сборки, базирующийся на построении фазовых портретов процессов относительного и углового совмещения сборочных компонент. Введены оценочные критерии для анализа способов автоматизированной сборки. Представлены результаты математического моделирования некоторых способов автоматизированной сборки на фазовой плоскости.

The method of the analysis of automated assembly techniques based on the construction of phase portraits of relative and angular overlapping of connected details is offered. The results of mathematical modeling of some automated assembly technique are presented. The estimate criteria for the automated assembly technique analysis are entered.

Ключевые слова: автоматизированная сборка, математическое моделирование, способ сборки, фазовые портреты относительного и углового совмещения сборочных компонент.

Keywords: automated assembly, mathematical modeling, assembly technique, phase portraits of relative and angular overlapping of connected details.

Введение

В теории управления при исследовании нелинейных систем с целью представления сложных динамических процессов прибегают к понятиям фазового пространства, фазовой плоскости и фазовой траектории [1], которые представляют собой наглядную геометрическую иллюстрацию поведения реальной системы в процессе управления. Поскольку система автоматизированной сборки представляет собой динамическую нелинейную систему, то, базируясь на принципах формирования фазовых траекторий теории нелинейных систем, можно осуществить отображение сложных динамических процессов, характерных для сборочной системы, в фазовом пространстве. При этом целью выполнения подобных преобразова-

ний является получение наглядной геометрической иллюстрации поведения сборочных компонент в процессе автоматизированной сборки, что позволяет подойти к анализу систем автоматизированной сборки совершенно с новой позиции.

По аналогии с теорией автоматического управления, в которой обобщенным представлением результатов исследования системы на фазовой плоскости является ее "фазовый портрет", заключающий в себе совокупность возможных форм переходных процессов в системе при любых начальных условиях. При анализе системы автоматизированной сборки наибольший интерес представляет получение наглядного обобщенного представления процесса взаимодействия сборочных компонент, определяющего способ сборки. Поскольку исследование способа сборки подразумевает выявление закономерностей в поведении обеих соединяемых деталей, то отображение фазовых траекторий, соответствующих каждой из деталей, на единую фазовую плоскость (пространство) позволит получить уникальные геометрические образы, характеризующие соответствующий способ сборки.

Способ сборки (с позиции адаптации деталей) представляет собой совокупность преобразований, заключающихся в целенаправленном изменении взаимной ориентации собираемых деталей для совмещения их сопрягаемых поверхностей. Геометрическое представление процессов изменения линейных и угловых координат деталей на различных этапах операции сборки и соответствующих им ограничений может быть проиллюстрировано фазовыми траекториями на фазовых плоскостях, соответствующих относительной и угловой адаптации. Подобное представление процесса сборки может быть названо *фазовыми портретами относительного и углового совмещения сборочных компонент*.

1. Представление процесса совмещения сборочных компонент в декартовой системе координат

Чтобы пояснить принцип изображения способа автоматизированной сборки на фазовой плоскости,

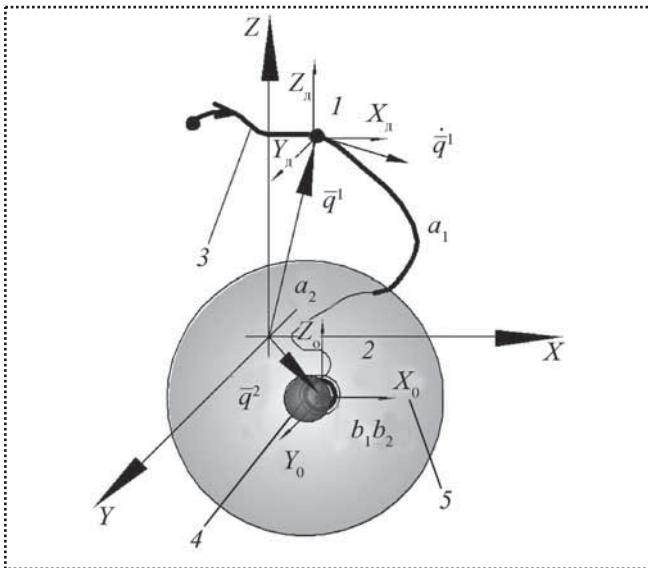


Рис. 1. Изображение процесса относительного совмещения деталей при сборке в декартовой системе координат

рассмотрим процесс относительного совмещения сборочных компонент для некоторого способа автоматизированной сборки в декартовой системе координат (рис. 1).

На рис. 1 использованы следующие обозначения: точками 1 и 2 обозначены 1-я и 2-я соединяемые детали; 3 – траектория совмещения; 4 – зона допустимого рассогласования; 5 – зона относительной адаптации; \vec{q}^1 – радиус-вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат XYZ и начало подвижной системы координат, связанной с 1-й деталью $X_d Y_d Z_d$; \vec{q}^2 – радиус-вектор, соединяющий начало неподвижной системы координат XYZ и начало подвижной системы координат, связанной со 2-й деталью $X_0 Y_0 Z_0$; \dot{q}^1 – первая производная обобщенной координаты q^1 ; a_1 – траектория транспортного этапа для 1-й детали; b_1 – траектория транспортного этапа для 2-й детали (на рис. 1 вырождена в точку); a_2 – траектория на этапе относительной адаптации для 1-й детали; b_2 – траектория на этапе относительной адаптации для 2-й детали. Процесс автоматизированной сборки характеризуется также при помощи следующих областей: зоной относительной адаптации 5, размеры которой определяет применяемый способ сборки, и зоной допустимого рассогласования, определяемого точно совмещения сборочных компонент.

Представленный на рис. 1 процесс относительного совмещения осей деталей при сборке заключается в следующем:

1-й этап представляет собой транспортное движение: в начальный момент времени $t = 0$ деталь 1 пере-

мещается по транспортной траектории a_1 , определяемой характеристиками транспортного устройства; деталь 2 располагается неподвижно (базируется) в некоторой зоне допустимого рассогласования, ее транспортная траектория a_2 вырождается в точку;

2-й этап (относительная адаптация) начинается с момента попадания кривой 3, изображающей траекторию совмещения детали 1 в зону относительной адаптации, при этом деталь 1 начинает двигаться по траектории a_2 , определяемой характеристиками адаптирующего устройства, до момента попадания в зону допустимого рассогласования. При этом деталь 2 остается неподвижной в данной области, а ее траектория относительной адаптации b_2 вырождается в точку. Когда расстояние между деталями 1 и 2 станет соответствовать допустимому рассогласованию, то это означает, что этап относительной адаптации завершен и возможно совмещение сборочных компонент при условии отсутствия углового рассогласования между деталями.

На основании такого подхода возможно лишь получение информации о геометрических характеристиках траектории совмещения, а также областей относительной адаптации и допустимого рассогласования. Однако полноценное представление о процессе сборки предусматривает анализ скоростей сборочных компонент. Поэтому целесообразнее исследовать процесс сборки при помощи единого инструмента, позволяющего наглядно отображать как перемещения сборочных компонент, так и их скорости. В качестве данного инструмента наиболее подходит фазовое пространство. Для начала ограничимся размерностью $n = 2$, т. е. фазовой плоскостью.

2. Построение фазового портрета относительного совмещения сборочных компонент

На рис. 2 представлено отображение описанного ранее (см. рис. 1) процесса сборки на фазовую плоскость.

На рис. 2 введены обозначения: 1 и 2 – исходное положение 1-й и 2-й соединяемых деталей; 3 – реальная граница зоны относительной адаптации; 4 – границы допустимых скоростей на этапе совмещения; q – обобщенная координата относительного совмещения; \dot{q} – первая производная обобщенной координаты q ; a_1, b_1 – траектории транспортного этапа для 1-й и 2-й деталей соответственно; a_2, b_2 – траектории на этапе относительной адаптации для 1-й и 2-й деталей соответственно. Введены границы следующих областей: границы перемещений – q^c и допустимых скоростей – \dot{q}_{\max} на этапе относительной адаптации – формирующей зону относительной адаптации; границы допустимого рассогласования 4 и допустимых

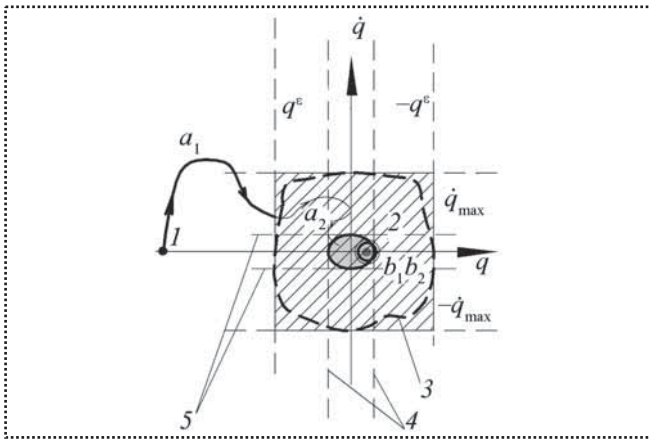


Рис. 2. Изображение процесса относительного совмещения деталей на фазовой плоскости:

- зона относительной адаптации;
- зона допустимого рассогласования

скоростей 5 на этапе совмещения – формируют зону допустимого рассогласования. Отображение на фазовую плоскость процесса изменения относительных координат деталей в процессе сборки в дальнейшем будем называть *фазовым портретом относительного совмещения сборочных компонент*.

3. Построение фазового портрета углового совмещения сборочных компонент

Так как положение каждой из соединяемых деталей в процессе сборки характеризуется изменением не только относительных, но и угловых координат, следовательно, необходимо также представить процесс углового совмещения на фазовой плоскости. Эта процедура будет носить название *фазовый портрет углового совмещения сборочных компонент*.

Процесс углового совмещения соединяемых деталей показан на рис. 3. Введены следующие обозначения: точки 1 и 2 – исходное угловое положение 1-й и 2-й соединяемых деталей соответственно; φ – обобщенная координата углового совмещения; $\dot{\varphi}$ – первая производная обобщенной угловой координаты φ . Следует обратить внимание, что координатные оси фазовой плоскости углового совмещения поменялись местами. Это требуется для согласования момента начала углового совмещения с фазовым портретом относительного совмещения (на рис. 3 на координате относительного совмещения q^i начинается этап углового совмещения). Аналогичным образом, как и для фазового портрета относительного совмещения, введены границы следующих областей: границы угловых перемещений – φ^γ и допустимых угловых скоростей – $\dot{\varphi}_{\max}$ на этапе угловой адаптации – формируют зону угловой адаптации; границы допустимого рассогласования и допустимых скоростей на этапе совме-

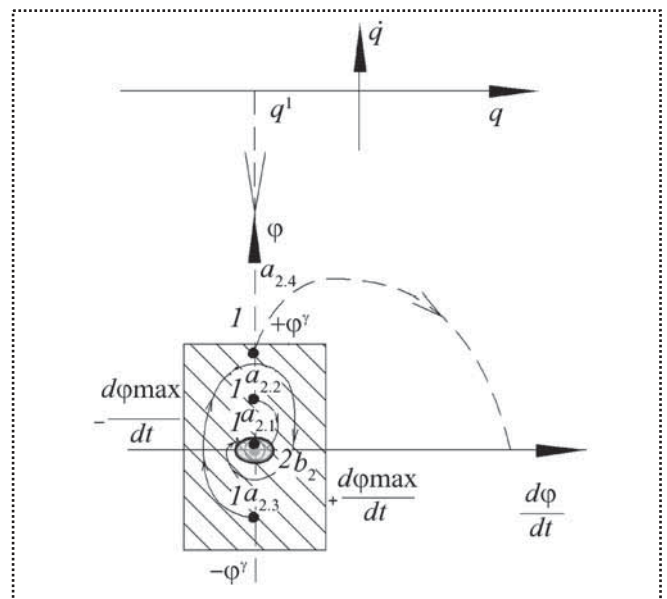


Рис. 3. Изображение процесса углового совмещения деталей на фазовой плоскости:

- зона угловой адаптации;
- зона допустимого рассогласования

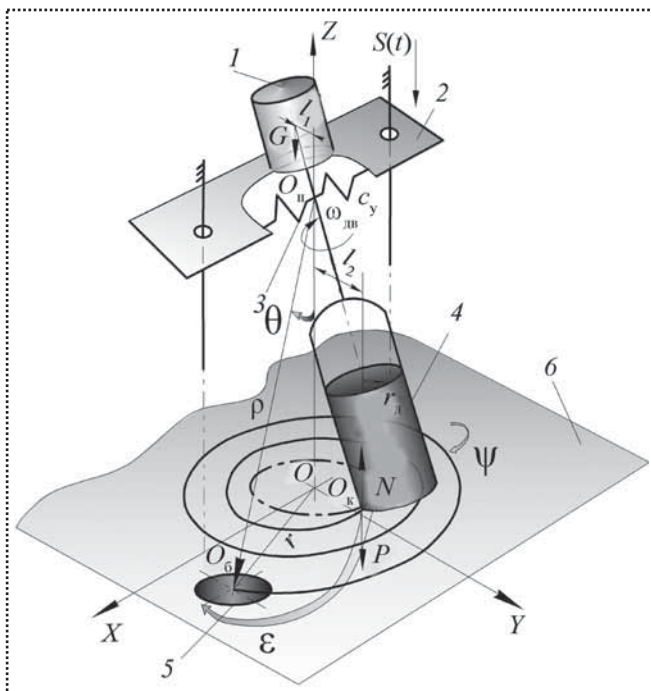
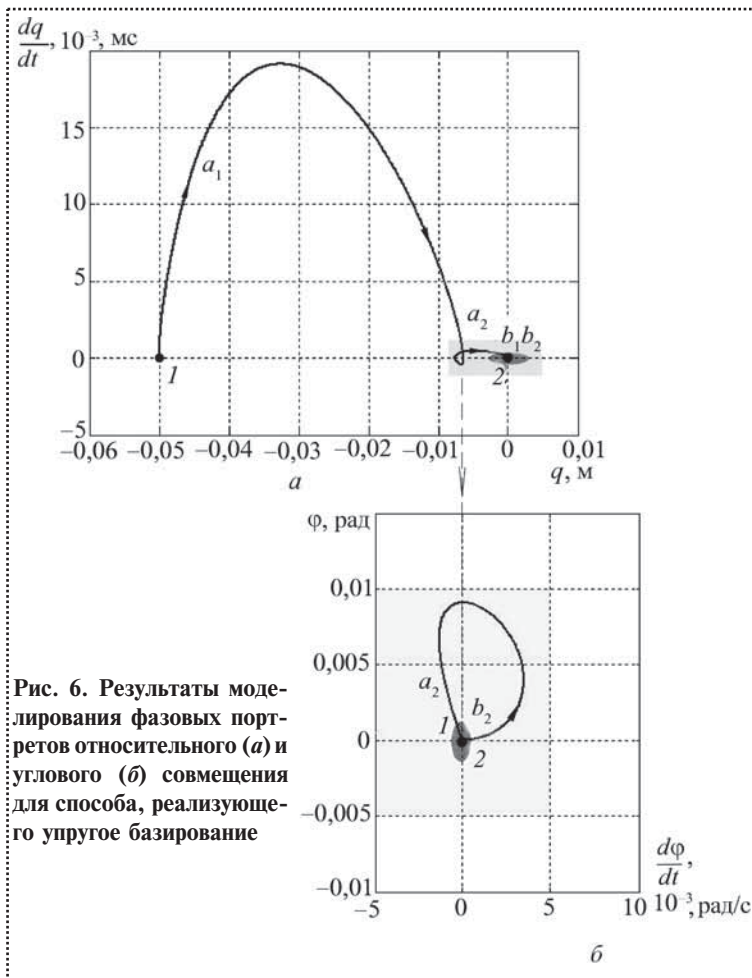
щения – формируют зону допустимого углового рассогласования. Обозначения для траекторий: a_2 , b_2 – траектории на этапе угловой адаптации для 1-й и 2-й деталей соответственно. С целью демонстрации возможностей отображения процессов на фазовой плоскости на рис. 3 приведены несколько вариантов траекторий угловой адаптации для 1-й детали. Сопоставив предложенным траекториям разработанные в теории управления фазовые портреты переходных процессов [1], можно получить представление о характере протекающих динамических процессов при совмещении сборочных компонент:

- траектория $a_{2,1}$ соответствует неподвижному состоянию детали;
- $a_{2,2}$ – монотонному переходному процессу перемещения детали в зону допустимого углового рассогласования;
- $a_{2,3}$ – затухающему колебательному характеру процесса угловой адаптации;
- $a_{2,4}$ – неустойчивому движению "в малом" детали, покидающей область адаптации.

Возможны и другие варианты траекторий, соответствующих множеству конструктивных реализаций способов адаптации.

4. Моделирование способов автоматизированной сборки на фазовой плоскости

В качестве демонстрации возможностей геометрического представления способов автоматизированной



μ_d, μ_T – коэффициенты вязкого трения при деформации упругих элементов и при относительном движении детали;

$c_z, c_r, c_{изг}$ – осевая, радиальная и изгибная жесткости упругого подвеса соответственно;

$F_{дв}, M_{дв}$ – движущие силы и моменты;

J_d – момент инерции присоединяемой детали относительно оси OY ;

r_z – расстояние от центра адаптирующего устройства до точки контакта присоединяемой детали с базовой;

h_d – высота присоединяемой детали;

h_0 – исходная координата основания детали по оси OZ ;

α – угол наклона направляющей поверхности базовой детали;

q_z – задающее воздействие (перемещение адаптирующего устройства по координате z);

$\Delta_{доп}$ – предельно допустимое относительное рассогласование соединяемых деталей;

$\varphi_{пр}$ – предельно допустимое угловое рассогласование соединяемых деталей;

$\varphi, \frac{d\varphi}{dt}$ – координата угловой адаптации и ее

первая производная.

Моделирование с целью построения фазового портрета для способа сборки, реализующего упругое базирование, проводили при следующих значениях параметров: $m_d = 0,010$ кг;

$\alpha = 0,785$ рад; $J_d = 0,05$ кг·м²; $\mu_d = 0,05 \frac{с \cdot Н}{М}$;

$\mu_T = 0,07 \frac{с \cdot Н}{рад}$; $c_z = 0,005 \frac{Н}{М}$; $c_r = 0,005 \frac{Н}{М}$;

$c_{изг} = 0,009 \frac{Н \cdot м}{рад}$; $r_z = 0,004$ м; $h_d = 0,008$ м; $h_0 = 0,05$ м;

$q_z = 0,005$ м; $\Delta_{доп} = 5 \cdot 10^{-5}$ м; $\varphi_{пр} = 0,01$ рад. Результаты математического моделирования представлены на рис. 6 и 7.

На фазовом портрете относительного совмещения в момент времени $t = 0$ позиции деталей обозначены точками 1 (вал) и 2 (отверстие). Относительное рассогласование деталей компенсируется за счет движения 1-й детали на транспортном этапе (a_1) с точностью позиционирования, гарантирующей попадание в зону относительной адаптации. Способ также характеризуется наличием этапа угловой адаптации для 1-й де-

Рис. 7. Динамическая модель способа ненаправленного поиска по спиральной траектории, реализуемого за счет изменения знака обратных связей адаптирующего устройства:

1 – электродвигатель; 2 – корпус; 3 – упругий подвес; 4 – соединяемая деталь; 5 – базовое отверстие; 6 – основание



тали и соответственно угловым перемещением, иллюстрируемым на фазовом портрете угловой адаптации (фазовая траектория a_2). Размеры зон адаптации существенно ограничены рабочей длиной фасок деталей.

Пример № 2. Способ ненаправленного поиска по спиральной траектории, реализуемый за счет изменения знака обратных связей адаптирующего устройства

Способ основан на использовании собственных движений адаптирующего устройства для осуществления программных траекторий ненаправленного поиска. Условием формирования собственных движений в форме расходящихся поисковых траекторий является неустойчивость адаптирующего устройства. Рассмотрим вариант реализации способа управления собственным движением адаптирующего устройства путем изменения знака обратных связей [4], динамическая модель которого представлена на рис. 7. Упругий подвес должен обеспечивать две угловые и две линейные степени подвижности детали.

Управляемыми координатами являются угловые координаты в сферической системе θ и ε , координатами совмещения $-\rho$, ψ .

Процесс адаптации имеет два этапа:

- поиск согласованного положения — относительная адаптация (вращение оси детали по определенному закону вокруг точки O_n):

$$\begin{aligned} X_{O_n} = Y_{O_n} = 0; \quad \varepsilon = \varepsilon_F(t) + \varepsilon_0; \quad \theta_1 = \theta_{1F}(t) + \theta_0; \\ \psi = \omega t; \quad \rho = \dot{\rho}t + \rho_0; \\ r = \rho \sqrt{\cos^2 \varepsilon \sin^2 \theta_1 + \sin^2 \varepsilon \cos^2 \theta_1}; \end{aligned} \quad (2)$$

- угловая адаптация (вращение оси детали вокруг точки O_6 с поступательным движением совмещения):

$$\begin{aligned} r = r_t = \text{const}; \quad \theta_2 = \theta_{2t} + \int \theta_1 dt; \\ \varepsilon = \varepsilon_t = \text{const}; \quad \psi = \omega t; \quad \rho = \dot{\rho}t + \rho_t. \end{aligned} \quad (3)$$

В формулах обозначены:

φ_F, θ_F — программные значения управляемых координат $\dot{\rho}, \omega$;

$\dot{\theta}$ — скорости изменения координат;

r — расстояние от точки контакта деталей O_k до начала координат в точке O ;

ρ — расстояние от центра подвеса до точки контакта деталей O_k .

Задающим устройством программной траектории устойчивого движения является электродвигатель I (см. рис. 7). При отсутствии проскальзывания детали по базовой плоскости угол ε изменяется по закону $\varepsilon = \omega t$. Точка контакта перемещается по окружности $x^2 + y^2 = \rho_0^2 \sin^2 \theta_0$.

Для формирования поисковой программной траектории необходимо управление второй обобщенной координатой — углом θ . Объект управления (осесимметричные детали, образующие цилиндрические, конические, резьбовые соединения) по этой координате в первом приближении описывается уравнением

$$J_1 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \mu_1 \frac{d\theta}{dt} + (c_y - Gl_1 - Nl_2) \theta = M_b, \quad (4)$$

где J_1 — момент инерции подвижной части устройства относительно центра подвеса;

μ_1 — коэффициент вязкого трения в упругом подвесе;

c_y — угловая жесткость упругого подвеса;

G и N — сила тяжести подвижной части и реакция в точке контакта деталей;

l_1 и l_2 — плечи сил тяжести и реакции относительно центра подвеса O_n .

Переход от уравнений к передаточным функциям объекта управления позволяет воспроизвести структурную схему, показанную на рис. 8.

Отрицательная обратная связь по координате θ может изменять знак в зависимости от соотношения слагаемых приведенной жесткости. Этот факт является ключевым для получения желаемых поисковых траекторий.

В случае отрицательной обратной связи установившееся движение при $t \rightarrow \infty$ характеризуется тем, что $\theta = \theta_0$, т.е. движение детали происходит по окружности. В случае положительной обратной связи при $t \rightarrow \infty$ $\theta \rightarrow \infty$, т.е. движение детали происходит по расходящейся траектории (спирали). Таким образом, условием обеспечения поискового движения детали является неравенство

$$c_y < Gl_1 + Nl_2. \quad (5)$$

Для угловой адаптации детали после предварительной доориентации (наживления детали и ее невыхода из базового отверстия) необходимо уменьшение угла θ до предельно допустимых условиями сборки значений. Такое изменение координаты возможно только в устойчивой механической системе. Следовательно, на последнем этапе адаптации объект управления должен быть охвачен отрицательной обратной связью по координате θ , т.е. приведенная жесткость упругого подвеса должна удовлетворять условию

$$c_{np} > Gl_1 + Nl_2. \quad (6)$$

Таким образом, замыкание знакопеременной обратной связи по координате θ обеспечивается кинематической схемой устройства. Для управления параметрами обратной связи должно быть сформировано воздействие $S(t)$. Управляющим воздействием является перемещение нижней части цилиндрической пружины

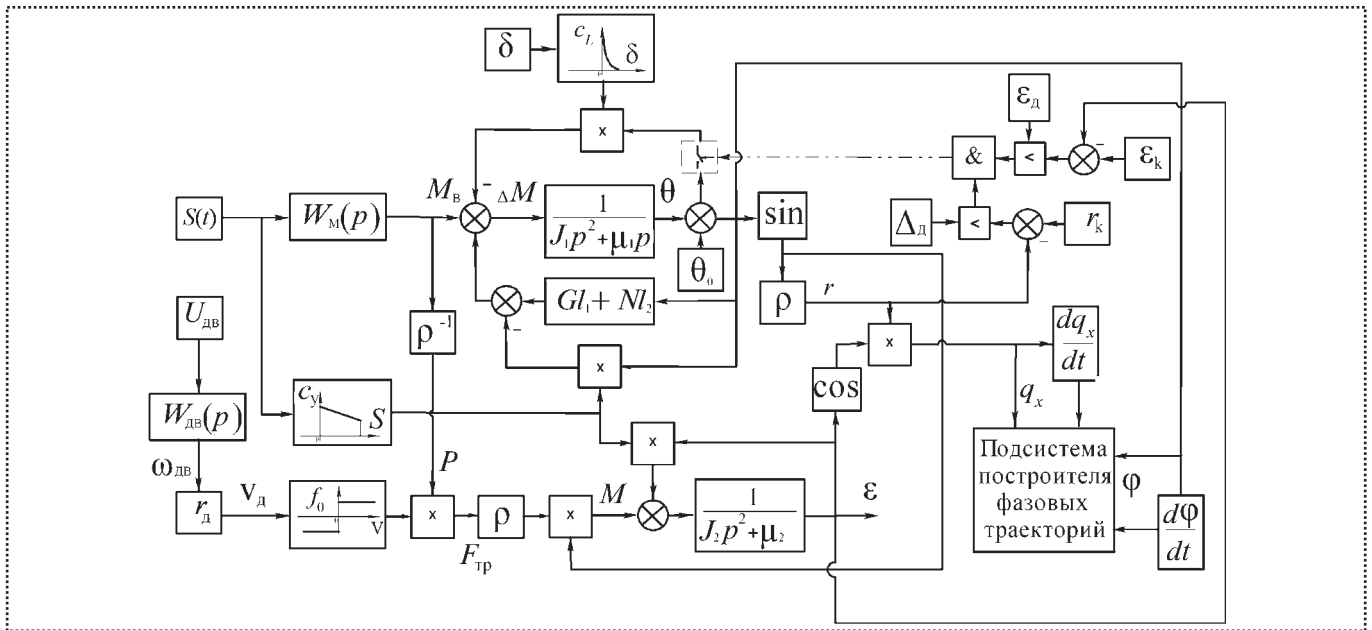


Рис. 8. Структурная схема способа ненаправленного поиска по спиральной траектории, реализуемого за счет изменения знака обратных связей адаптирующего устройства

жины упругого подвеса, вызывающее ее удлинение и уменьшение изгибной жесткости. Так как нижний конец пружины закреплен на корпусе, то управляющим воздействием является перемещение корпуса по направляющим.

Кроме перемещения корпуса управляющим воздействием является вращение детали вокруг оси симметрии. Крутящий момент двигателя через момент сил трения между контактирующими деталями преобразуется в движущий момент, обеспечивающий вращение устройства вокруг вертикальной оси, т.е. изменение угла ε . Поэтому устройство имеет второй канал управления, связанный с каналом управления по углу θ .

Входными координатами второго канала являются управляющее напряжение двигателя $U_{дв}$ и сила прижатия соединяемой детали к базовой P . Уравнения движения по координате ε имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} J_2(\theta) \ddot{\varepsilon} + \mu_2 \dot{\varepsilon} + c_y \varepsilon &= P f \rho \sin \theta; \\ f &= f_0 \operatorname{sign} v_d; \quad v_d = \omega_{дв} r_{дв} = W_{дв}(p) U_{дв} r_d \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где J_2 – момент инерции подвижной части устройства относительно оси OZ ;

μ_2 – коэффициент вязкого трения в точке контакта деталей;

f_0 – коэффициент трения покоя между материалами деталей;

v_d – окружная скорость детали;

$W_{дв}(p)$ – передаточная функция двигателя по скорости;

r_d – радиус детали.

С учетом математической модели второго канала структурная схема устройства принимает вид, показанный на рис. 8. Между каналами имеются перекрестные связи по координатам и моментам.

Рассмотренный вариант механизма изменения знака обратной связи не является единственным, поэтому конструктивные реализации предложенного способа формирования поисковых траекторий могут быть различными.

Моделирование с целью построения фазового портрета для рассматриваемого способа сборки проводили при следующих значениях основных параметров: $J_1 = 0,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $\mu_1 = 0,2 \frac{\text{с}\cdot\text{Н}}{\text{рад}}$; $G l_1 + N l_2 = 2,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$;

$J_2 = 0,4 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $\mu_2 = 0,18 \frac{\text{с}\cdot\text{Н}}{\text{рад}}$; $f_0 = 0,2$; $r_d = 0,01 \text{ м}$;

$\theta_0 = 0,1745 \text{ рад}$; $\rho = 0,2 \text{ м}$. Значения допустимых относительных и угловых рассогласований сборочных компонент приняты такими же, как и при моделировании в примере № 1. Функциональные зависимости жесткости от параметров смещений имеют сложный нелинейный характер.

Фазовые портреты относительного (а) и углового (б) совмещения сборочных компонент для способа ненаправленного поиска по спиральной траектории, реализуемого за счет изменения знака обратных связей адаптирующего устройства, изображены на рис. 9.

Фазовый портрет иллюстрирует геометрический образ, соответствующий процессам преобразования траектории совмещения, включающей транспортный этап (a_1), переходящий в этапы относительной и угловой адаптации, началом которых служит момент рас-

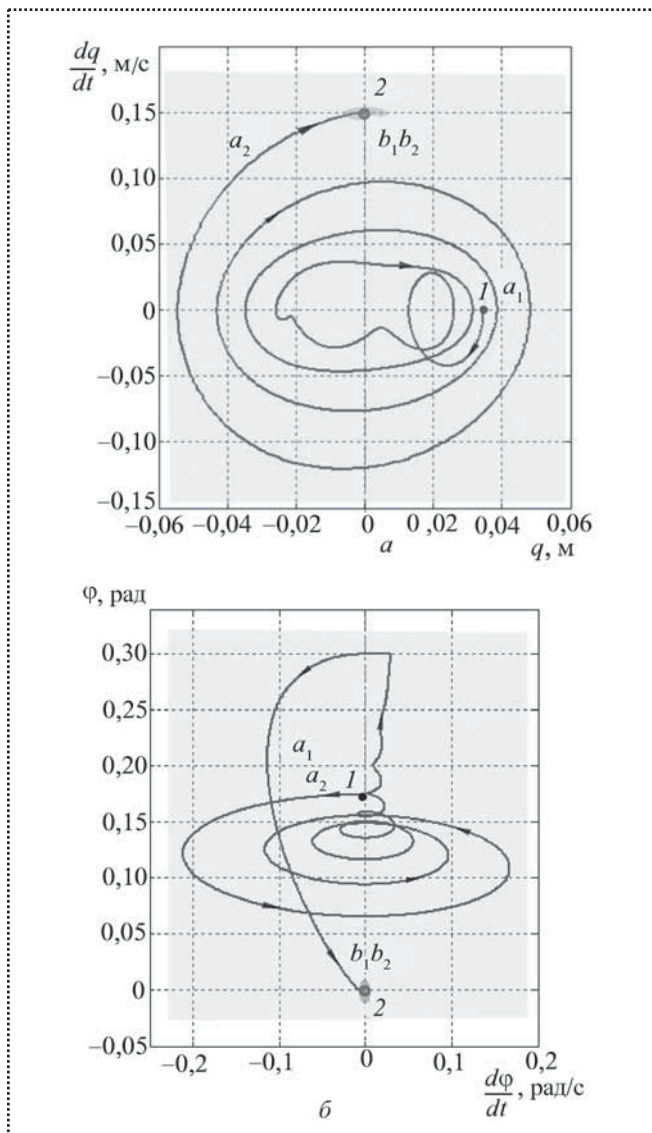


Рис. 9. Результаты моделирования фазовых портретов относительного (а) и углового (б) совмещения для способа ненаправленного поиска по спиральной траектории, реализуемого за счет изменения знака обратных связей адаптирующего устройства

кручивания спиральной фазовой траектории (a_2) при относительном совмещении. Для способа характерны значительные диапазоны областей относительной и угловой адаптации, определяемые конструктивными параметрами устройства.

Проводя подобный анализ других способов автоматизированной сборки, можно получить и их фазовые портреты. Построив множество фазовых портретов различных способов сборки, можно их сравнить с целью выбора наилучшего решения.

5. Оценочные критерии для анализа способов автоматизированной сборки

Однако применение фазовых портретов относительного и углового совмещения сборочных компо-

нент не ограничивается анализом динамики и геометрическим отображением процессов изменения координат и скоростей. С помощью фазовых портретов можно производить качественную оценку существующих способов автоматизированной сборки [5].

Для этого требуется ввести оценочные критерии:

1) начальное рассогласование деталей (расстояние между 1-й и 2-й деталями в начальный момент времени $t = 0$):

$\Delta q_{1-2}(t_0) = |q_1(t_0) - q_2(t_0)|$ – относительное начальное рассогласование;

$\Delta \varphi_{1-2}(t_0) = |\varphi_1(t_0) - \varphi_2(t_0)|$ – угловое начальное рассогласование;

2) допустимое рассогласование по координате (точность совмещения), гарантирующее сопряжение сборочных компонент по окончании этапов адаптации, характеризуется:

$q^\delta, -q^\delta$ – верхним и нижним пределами допустимого рассогласования по координате q ;

$\varphi^\lambda, -\varphi^\lambda$ – верхним и нижним пределами допустимого рассогласования по координате φ ;

3) допустимое рассогласование по скорости (условие совмещения), гарантирующее сопряжение сборочных компонент по окончании этапов адаптации, характеризуется:

$\dot{q}^\delta, -\dot{q}^\delta$ – верхним и нижним пределами допустимого рассогласования по относительной скорости;

$\dot{\varphi}^\lambda, -\dot{\varphi}^\lambda$ – верхним и нижним пределами допустимого рассогласования по угловой скорости;

4) производительность способа характеризуется отношением длины траектории совмещения к скорости движения;

5) синхронность выполнения этапов относительного и углового совмещения, выражаемая через соотношение времени начала этапов относительного t_0^q и углового t_0^φ совмещения:

$t_0^q = t_0^\varphi$ – синхронное выполнение совмещения;

$t_0^q \neq t_0^\varphi$ – асинхронное выполнение совмещения

(возможны варианты последовательного, последовательно-параллельного выполнения).

Управление движением сборочных компонент может включать управление перемещением одной или обеих деталей.

Заключение

Сборочное устройство и реализуемый им способ сборки представляется возможным отобразить в обобщенной форме в виде фазового портрета относительного и углового совмещения сборочных компонент на фазовой плоскости. Фазовый портрет, сущность которого заключается в сочетании перемещений и скоростей со-



едняемых деталей, является исчерпывающей характеристикой способа сборки. Переход к перемещениям и их производным процесса автоматизированного совмещения деталей позволяет отвлечься от конструктивных параметров сборочного устройства, оценив исключительно способ сборки.

Главным отличием рассмотренных способов сборки является характер изменения перемещений соединяемых деталей и их производных. Применение предложенного инструмента для отображения способов сборки в совокупности с оценочными критериями позволяет провести анализ нескольких возможных вариантов осуществления сборочной операции с целью выбора наилучшего решения и оценить возможные режимы работы для одного устройства, предоставляя возможность наглядного обоснования неэффективности одних и целесообразности использования других режимов при соответствующих параметрах элементов сборочной системы. Кроме того, создание целостной базы геометрических образов существующих способов сборки посредством фазовых портретов позволит переосмыслить применяемые в настоящее время классификации и с совершенно

новой позиции оценить направления развития средств автоматизированной сборки.

Библиографический список

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. Изд. 4-е, перераб. и доп. СПб.: Профессия, 2006. 752 с.
2. Управление дискретными процессами в ГПС / Л.С. Ямпольский, З. Банашак, К. Хасегава, Б. Крог, К. Такахашаи, А.В. Борузан. Киев: Тэхника; Вроцлав: Изд-во Вроцлав. политехн. ин-та; Токио: Токосё, 1992. 251 с.
3. Бедрин В.М., Бедрина А.В. Обзор методов и устройств автоматического ориентирования деталей при сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2000. № 2. С. 7–21.
4. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, А.Г. Схиртладзе, А.Л. Симаков, Д.С. Воркуев; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: КГТА, 2008. 616 с.
5. Кузнецова С.В. Алгоритм анализа режима функционирования управляющей автоматизированной системы // Вооружение. Технология. Безопасность. Управление. VI юбилейная всероссийская конференция аспирантов и молодых ученых: тезисы докладов. Ковров: ФГБОУ ВПО "КГТА имени В.А. Дегтярева", 2012. С. 101–102.

УДК 621.389

А.М. Медведев, д-р техн. наук, профессор (Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)),
Г.В. Мылов, инженер (Рязанский государственный приборный завод – ГРПЗ, директор производственного комплекса)
E-mail: medvedevam@bk.ru

Эволюция технологий электрических межсоединений в электронном приборостроении

Рассмотрены проблемы и перспективы развития технологий электрических межсоединений в электронном приборостроении, показаны возможные решения для дальнейшего развития отрасли.

The article considers the problem and prospects of development of the technologies of electrical interconnect in electronic instrument-making, the possible solutions for further development of the industry.

Ключевые слова: электронная сборка, электрическое межсоединение, производство электроники, перспектива развития.

Keywords: electronic assemble, electrical interconnection, electronics manufacturing, development prospect.

Процесс развития электронного приборостроения характеризуется увеличением плотности активных элементов на кристалле примерно на 75 % в год, а это,

в свою очередь, вызывает необходимость в увеличении числа их выводов на корпусе на 40 % в год. Этим обусловливается постоянно растущий спрос на новые методы корпусирования, а вслед за этим – на увеличение плотности межсоединений на печатных платах, на улучшение теплоотвода и увеличение токонесущей способности силовых цепей [1].

В результате общих тенденций площадь монтажных подложек уменьшается примерно на 7 %, а физические размеры электронной аппаратуры – на 10...20 % в год. Эта тенденция поддерживается непрерывным увеличением плотности межсоединений за счет уменьшения элементов печатного монтажа: ширины проводников и зазоров, отверстий и контактных площадок, пространственного (послойного) распределения межслойных переходов за счет использования сквозных, глухих, слепых отверстий. Все это серьезно влияет на условия производства печатных плат: увеличиваются стоимость основных фондов, объем прямых издержек и цикл производства [2].



Технологии печатных плат постоянно обрастают новыми приемами и операциями, расширяются их возможности за счет использования прецизионного оборудования, более качественных материалов и инструмента. От состояния технологий производства печатных плат непосредственно зависят масса и габариты электронной аппаратуры, ее функциональность, производительность, надежность, устойчивость к внешним воздействующим факторам.

В отечественной и зарубежной практике ведется непрерывный поиск новых и совершенствование известных методов межсоединений. Ежемесячно публикуются сотни патентов, описывающих новые процессы и операции, претендующих на новое слово в технологиях электронной аппаратуры. Среди достижений в технологии монтажа появлялись и методы, изобретение которых сопровождалось значительной рекламой, но на практике они оказались малоэффективными, или ненадежными, или нашли ограниченное применение. Ежегодные международные конференции, симпозиумы по международной стандартизации способствуют отбору выверенных решений, в дискуссиях специалистов и в практике использования роди-

лись новые базовые технологии. Именно для базовых общепринятых технологий разрабатывают стандарты, оборудование и материалы. На их основе строят новые производства с многомиллионными вложениями капитала.

Чтобы электронная промышленность смогла решить проблемы монтажа еще более плотных кремниевых кристаллов, будут необходимы некоторые изменения. В настоящее время промышленность находится на уровне, характеризуемом шагом выводов 0,8 мм, шириной проводников 100 мкм, диаметром переходных отверстий 100 мкм и размером контактных площадок 0,25 мм. В дальнейшем грядет установка на платы компонентов в микрокорпусах с шагом выводов 0,25 мм и бескорпусных кристаллов с шагом выводов 0,1 мм.

По существу это олицетворяет главные тенденции в эволюции межсоединений, которой подчинены все усилия в развитии технологии электроники (табл. 1). Приведенные в табл. 1 обозначения пояснены также на рисунке.

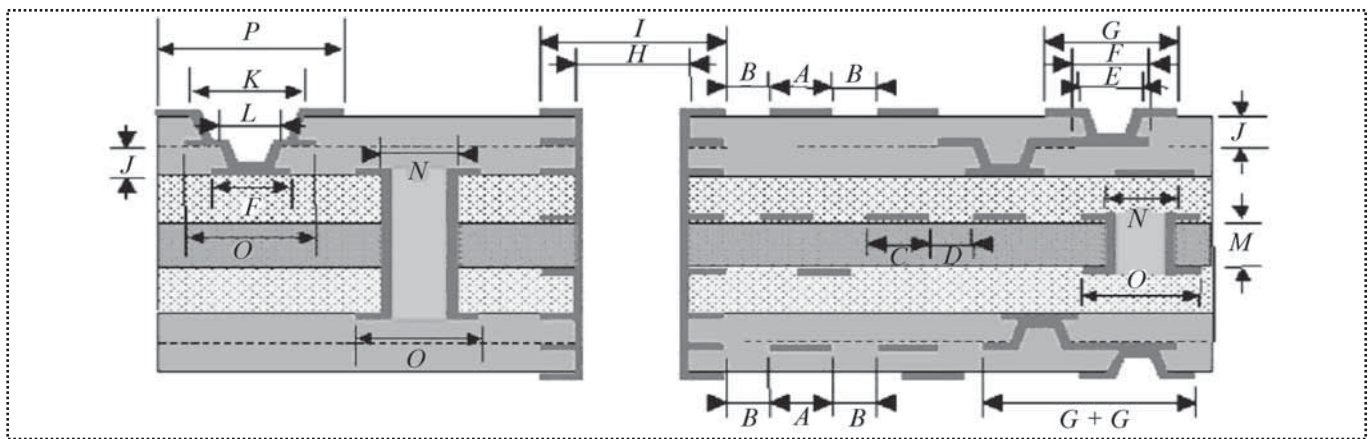
Рассмотрим главные проблемы развития технологий.

Таблица 1

Численные характеристики МПП в перспективе [3]

Символ	Параметр	Минимальный размер, мм		
		сегодня	в ближайшей перспективе	в дальнейшем
Характеристики рисунка				
<i>A</i>	Ширина проводника на внешнем слое	0,11	0,08	0,06
<i>B</i>	Зазор на внешней поверхности	0,120	0,100	0,065
<i>C</i>	Ширина проводника на внутреннем слое	0,10	0,05	0,03
<i>D</i>	Зазор на внутреннем слое	0,12	0,08	0,04
Характеристика сквозных отверстий				
<i>H</i>	Диаметр сверления	0,25	0,20	0,15
<i>I</i>	Размер контактной площадки	0,55	0,50	0,40
—	Отношение толщины платы к диаметру сквозного отверстия	10	14	18
Характеристики глухих отверстий				
<i>E</i>	Диаметр	0,150	0,085	0,045
<i>F</i>	Размер контактной площадки основания	0,35	0,25	0,06
<i>G</i>	Размер контактной площадки входа	0,40	0,30	0,10
<i>J</i>	Отношение глубины к диаметру глухого отверстия	1,0	1,0	1,5

Символ	Параметр	Минимальный размер, мм		
		сегодня	в ближайшей перспективе	в дальнейшем
<i>K</i>	Диаметр верхнего глухого отверстия	0,175	0,150	0,075
<i>L</i>	Диаметр нижнего глухого отверстия	0,100	0,075	0,035
<i>P</i>	Размер контактной площадки верхнего глухого отверстия	0,375	0,325	0,250
Характеристики слепых отверстий				
<i>M</i>	Глубина металлизированного слепого отверстия	0,20	0,15	0,10
<i>N</i>	Диаметр сверления	0,25	0,20	0,20
<i>O</i>	Размер контактной площадки	0,55	0,50	0,40



Параметры многослойной структуры межсоединений

Проблемы базовых материалов

Важность этих проблем для развития технологии межсоединений обусловлена следующими их особенностями:

- свойства базовых материалов определяют технологичность и технический уровень печатных плат, их устойчивость к внешним воздействиям;
- производство базовых материалов – очень капиталоемкое и потому инертное производство;
- успехи в развитии производства базовых материалов связаны с качеством полуфабрикатов, поставляемых совершенно разнородными отраслями промышленности: химическими, металлургическими, металлообрабатывающими и электротехническими, объединить усилия которых для достижения единой цели очень трудно, но от их успехов напрямую зависит улучшение свойств таких композиционных материалов, как, например, фольгированные стеклопластики и пленки [4].

Малые объемы производства российской электроники (0,5 % от мирового объема) делают нерентабельным отечественное производство материалов. Многие отечественные производители фольгированных диэлектриков разорились и прекратили существование, оставив на российском рынке единственную фирму – НТЦ "ЭЛИФОМ", выжившую за счет хорошего научно-технического потенциала.

Кроме непрерывного улучшения существующих материалов для удовлетворения потребностей будущего необходимо разработать и некоторые новые материалы.

Для изделий с высокой плотностью межсоединений или корпусов кристаллов с применением базовых материалов печатных плат срочно требуются материалы, позволяющие выполнять лазерную резку или формировать проводники малой ширины. Более того, также востребованы новые материалы, упрощающие встраивание компонентов в платы или улучшающие электрические и тепловые характеристики. В табл. 2



Свойства и применение перспективных материалов

Перспективный материал	Свойство	Применение
Медь, покрытая смолой	Возможность изготовления более тонких ди- электриков; отсутствие армирования; возможность выполнения переходных отверстий лазерными и плазменными инструментами	Микропереходные отверстия
Фольга для встроенных компонентов	Высокое сопротивление	Формирование встроенных резисторов
Резисторы	Точно заданное сопротивление; уменьшенное число компонентов на внешних слоях, позволяющее уменьшить размеры плат	Печатные платы со встроенными пас- сивными компонентами
Тонкие материалы для конденсаторов	Возможность создания тонких диэлектриче- ских слоев для формирования встроенных кон- денсаторов; уменьшение числа компонентов на внешних слоях, позволяющее уменьшить размеры плат	Печатные платы со встроенными пас- сивными компонентами
Базовые материалы с нетканым армированием (арамид)	Возможность резки лазерными и плазменными инструментами; низкая диэлектрическая постоянная; низкий коэффициент температурного расширения; повышенная стабильность размеров; контролируемая толщина; высокая температура стеклования; превосходная устойчивость к образованию проводящих анодных нитей; низкая плотность	Сложные печатные платы, микропере- ходные отверстия, кристаллодержатели, микрокорпуса, детали с малой шириной и зазорами между проводниками, воен- ные изделия, авионика
Фольга с обработкой обратной стороны	Улучшенное травление; низкий профиль шероховатости	Детали с малыми шириной и зазорами между проводниками

показано несколько новых и перспективных матери-
алов и описаны их свойства. Проблема заключается в
том, чтобы четко определить, как эти свойства будут
получены в производстве печатных плат.

Перед производителями материалов для изготов-
ления печатных плат стоит множество проблем, тре-
бующих решения.

Повышенный спрос на портативные потребитель-
ские изделия подталкивает развитие более тонких и

плотных структур. Спрос на беспроводные изделия,
работающие в гигагерцовом диапазоне на значитель-
ных уровнях мощности, также приводит к потребно-
сти в СВЧ-материалах. При разработке новых изде-
лий необходимо рассматривать различные варианты
материалов для высокоскоростных схем. Например,
материалы с высокочастотными свойствами изучены
мало, и если эта технология будет применяться,
потребуется огромный объем работ.



К материалам, необходимым для изготовления высокоскоростных схем, относят:

- материалы для плат со встроенными компонентами, таких как резисторы, индуктивности и конденсаторы;
- пластики повышенной жесткости, проявляющие улучшенные тепловые характеристики;
- тонкие базовые материалы для технологии микропереходных отверстий;
- тонкая металлическая фольга без пор (без проколов);
- материалы армирования, альтернативные стеклу, для очень тонких внутренних слоев многослойных плат;
- материалы с низкой диэлектрической проницаемостью для высокочастотных и радиочастотных изделий;
- безгалогенные базовые материалы для решения экологических проблем.

В будущем возможна жесткая конкуренция между устройствами для передач данных по каналам на основе меди и устройствами на основе волоконной оптики в диапазоне 5...10 ГГц. Однако работы по совершенствованию материалов и технологии в области медных печатных плат могут продлить срок полезного использования технологии на основе меди в этом частотном диапазоне и отложить внедрение плат с оптическими межсоединениями.

Проблемы материалов для формирования внутренних пассивных компонентов

Для улучшения качества указанных материалов следует решить следующие проблемы:

- расширить возможности существующих материалов для формирования емкостей с большими значениями и большей точностью;
- создать составы и технологические процессы для изготовления более точных резисторов;
- организовать применение уже имеющихся процессов и оборудования для изготовления резисторов и конденсаторов;
- организовать изготовление компонентов с достаточной точностью, чтобы отказаться от лазерной подгонки [5].

Проблемы паяльной маски

В настоящее время паяльная маска выполняет несколько функций:

- защиты диэлектрической поверхности от воздействия флюса и припоя, будь то пайка оплавлением паяльной пастой, пайка волной или ручная пайка. Эти процессы становятся бессвинцовыми и связанные с ними температуры сборочных процессов возрастают, что приводит к необходимости обеспечения

большей устойчивости маски к термодеструкциям. При этом число циклов нагрева увеличивается из-за растущей сложности методов сборки, монтажа компонентов на обе стороны и индивидуальной установки компонентов сложной формы, таких как элементы источников питания. Кроме того, могут иметь место циклы нагрева для отверждения подзаловки компонентов типа flip-chip или BGA и для отверждения клеев;

- улучшения электрических свойств поверхности печатных плат;
- защиты поверхности печатных плат от воздействия химических растворов, используемых для химического и иммерсионного нанесения финишных покрытий, например, ENIG или иммерсионного олова.

Паяльная маска должна быть плоской, поскольку компоненты с матричным расположением выводов устанавливаются поверх нее.

Улучшенные технологии "применения только там, где необходимо", такие как струйная печать, могут оказать помощь в используемых в настоящее время методах формирования изображений. Ведь паяльную маску необходимо наносить только там, где это оправдано технически, а не на всю плату. Селективное нанесение позволит сэкономить материал и, возможно, обеспечить изготовление плат с лучшими электрическими характеристиками.

Струйная печать имеющихся в ассортименте красок – процесс, который в настоящее время фактически освоен, и эту технологию необходимо расширять для других процессов формирования рисунков.

Проблема заполнения отверстий

Сложность материалов для заполнения отверстий изменилась от простой однокомпонентной оксидной паяльной маски до современных теплопроводных, металлизированных и устойчивых к флюсу составов.

Несмотря на то, что заполнение отверстий в прошлом считалось лишь вопросом, о котором стоит задуматься, в настоящее время оно определяется как необходимая часть процесса изготовления плат.

Проблемы с фотошаблонами

Увеличение диапазонов температуры и влажности при использовании фотошаблонов вызывает проблемы с шаблонами на полимерной основе. Стекланные шаблоны обладают меньшей нестабильностью размеров, но стоят гораздо дороже. Систематические дефекты, возникающие из-за прилипшей грязи, вызывают проблемы при контактной печати. Избежать этого можно с помощью периодической автоматической инспекции фотошаблонов. Коллимированные



источники света могут решить эти проблемы, обеспечивая возможность бесконтактной печати.

Применение прямого лазерного экспонирования фоторезиста позволит отказаться от операции изготовления фотошаблонов. К тому же распознавание рисунка в процессе прямого экспонирования улучшит совмещение рисунков путем адаптирования изображения к уже имеющемуся рисунку на плате с учетом его смещения в результате естественной деформации.

Наконец, прямое нанесение материалов рисунков (или даже проводников) с помощью таких технологий, как струйная печать, устранил необходимость в фотошаблонах. Появилась надежда прямого нанесения проводящего рисунка на плату за счет использования процесса низкотемпературного (150 °С) восстановления металла из наноструктурированных паст (красок).

Проблемы, связанные с формированием рисунков на внутренних слоях

Тонкая медная фольга остается более предпочтительной при изготовлении многослойных плат из-за необходимости формирования элементов малых размеров, в особенности малых зазоров. Это прежде всего относится к малогабаритным слаботочным изделиям электроники.

Более тонкая медь позволяет создавать элементы меньших размеров и улучшить точность воспроизведения ширины проводников. В первую очередь такую технологию применяют для изготовления гибких плат и монтажных подложек для корпусирования кристаллов.

Прямое нанесение материалов резиста с помощью таких технологий, как струйная печать, могло бы изменить изготовление внутренних слоев в новых процессах литографии.

Российская компания "Остек-Сервис-Технология" пошла дальше, предложив технологию и оборудование для анизотропного травления меди. Этот процесс обеспечивает почти вертикальные стенки вытравленного рисунка [6].

Проблемы с малыми размерами элементов проводящего рисунка связаны с инженерным обеспечением производственных помещений, так как размеры пылинок становятся соизмеримыми с размерами элементов печатного рисунка плат. Технические улучшения в соответствующих областях (чистота производственных помещений, подготовка поверхностей, фильтрация проявителя и раствора для снятия фоторезиста и оптическая инспекция) повысят выход годных изделий с малыми элементами рисунка и их надежность.

Доля жидкого резиста среди материалов слоев для травления продолжает расти, в особенности, в промышленности Азии. Полуаддитивный метод получения рисунка поможет в изготовлении медных проводников управляемой формы. Наконец, ряд поставщиков работают с материалами для струйного нанесения резиста, повышая тем самым разрешающую способность рисунка проводников.

Проблемы, связанные с формированием рисунка на внешних слоях

Проблемы химического характера при металлизации медью заключаются в обеспечении баланса между заполнением микропереходных отверстий на поверхности плат и поддержанием отличной пластичности меди в отверстиях. Желаемый результат может быть достигнут путем двухстадийной металлизации, но этот подход не очень производителен, и имеющиеся линии металлизации не обладают такими возможностями.

Дальнейшее внедрение технологий импульсной металлизации позволит выполнять более качественные глухие и микропереходные отверстия благодаря меньшему выделению водорода и меньшим пустотам, образуемым при таком подходе.

Снова может вызвать интерес полностью аддитивная толстослойная медь. Главные ее недостатки трудно преодолимы: необходимость в химически стойком толстом фоторезисте и длительность процесса металлизации до нужных толщин.

Проблемы медных проводников

Повсеместное применение бессвинцовой технологии пайки дало новый повод для беспокойства. Было замечено, что бессвинцовые составы с большим содержанием олова растворяют при пайке гораздо больше меди, чем эвтектический припой. Это растворение, которое иногда ошибочно называют эрозией, наиболее часто возникает в месте перехода металлизации отверстия в контактную площадку и преимущественно происходит при быстром течении припоя, таком как при ремонте с применением ролничковой волны, при пайке волной и нанесении покрытия горячим лужением с выравниванием воздушным ножом (HASL). Особая обработка гальванической меди делает нанесенные слои меди более устойчивыми к этому явлению, но конкретные рекомендации еще не сформулированы.

Альтернатива меди — некоторые нанокремниевые соединения, которые позиционируют как материалы с меньшим, чем у меди, электрическим сопротивлением. Эти соединения могут оказаться актуальными для увеличения скорости передачи сигналов.



Импульсная металлизация микропереходных и переходных отверстий малого диаметра требует серьезных исследований для практических рекомендаций производству.

Проблемы обработки тонких материалов (гибкие платы)

Гибкие платы – характерные представители тонких материалов в целом. Их производство продолжает развиваться быстрее, чем производство жестких плат. Новое конвейерное оборудование позволяет обрабатывать толщины слоев в 50 мкм и менее благодаря таким операциям, как альтернативное процессу оксидирования конвейерное удаление смол, металлизация отверстий, нанесение, проявление, травление и снятие резиста. Не исключено, что возможно изготовление непрерывных в линии материалов слоев. Непрерывные гибкие материалы существуют, но большинство операций пока что поэтапны, материал несколько раз сворачивается в рулон и переносится на следующее рабочее место вместо того, чтобы обеспечить выполнение всех операций в одной последовательности. Более широкое применение армированных пленок, таких как полиимид, жидкокристаллический полимер и т.п., может привести к осуществлению перехода на непрерывную обработку. Одним из "законодателей мод" в технологии может быть изготовление антенн для радиочастотных меток (RFID) в виде непрерывной ленты. Все операции в технологии RFID должны иметь минимально возможную стоимость, чтобы удовлетворять ценовым задачам для технологии массового производства.

Проблемы прессования многослойных печатных плат

Для материалов многослойной технологии сборки с более высокими температурами стеклования требуются новые режимы нарастания температуры и давления.

Новые безгалогенные базовые материалы пока не потребовали существенного изменения режима прессования.

Некоторые новые неармированные материалы, такие как жидкокристаллический полимер, являются, на самом деле, термопластами, и для того, чтобы избежать излишнего течения пластика, необходимо очень точно выдерживать температуру. Чтобы обеспечить режимы температуры и давления в этих развивающихся процессах, требуется возврат к забытой уже технологии прессования в автоклавах. Такие методы сборки и совмещения слоев, как метод с применением штырей, прокалывающих лист соединительного материала, требуют очень высокого качества управления процессом.

Две противоречивые тенденции ставят перед оксидацией слоев для адгезии новые задачи: повышение температуры бессвинцовых процессов и более гладкая геометрия трасс проводников в высокочастотных изделиях.

Теоретически могут быть разработаны новые химические составы для обеспечения адгезии слоев, отличные от оксидации меди, например, такие как органические усилители адгезии.

Проблемы формирования отверстий (механического и немеханического характера)

Проблемой для механической сверловки является экономичное изготовление гигантского числа межслойных вертикальных межсоединений.

Меньший размер отверстий необходим, чтобы большее их число было выполнено на ограниченной площади платы и чтобы больше отверстий могло быть предусмотрено конструктором. В некоторой степени помогает лазерное формирование микропереходных отверстий, поскольку они быстрее выполняются лазером, чем механической сверловкой.

Подход переходных отверстий до любого слоя предполагает, что на всех слоях может применяться лазерная сверловка. Лазерное оборудование с несколькими головками сверления, основанное на разделении луча, может повысить производительность этой технологии изготовления [7].

Повышение производительности и точности сверления зависит от самого сверла и точности позиционирования сверления, которая определяется возможностью оборудования, – здесь явные преимущества сверления механическим методом.

Разновидностью сверления с управляемой глубиной является рассверливание металлизированных отверстий с обратной стороны, при котором частично удаляется металлизация из отверстий плат, что улучшает высокочастотные свойства платы.

Проблемы паяемости и финишные покрытия

Финишное покрытие должно быть пригодно не только для пайки, но и для проволоочной разварки. Также требуется устойчивость покрытий к нескольким циклам нагрева, поскольку на плату наносится и отверждается клей, а паста наносится с обеих сторон платы. Наконец, финишное покрытие должно позволять выполнять сборку с еще более мягкой отмывкой или вообще без отмывки.

Агрессивные флюсы, которые могут сделать почти любую поверхность паяемой, ушли в прошлое из-за ограничений, накладываемых на химические составы для отмывки плат.

Процессы нанесения финишных покрытий также должны быть совместимы с устойчивостью паяльных



масок. В последнее время проблемой при работе электронных сборок в агрессивных атмосферах стала ползучая коррозия.

Одним из способов решения этой проблемы могут быть изменения в финишных покрытиях печатных плат.

Большое разнообразие финишных покрытий говорит об отсутствии выбора в пользу какого-либо одного-двух, пусть трех, удовлетворяющих всем требованиям по стоимости, смачиваемости, долговременности и т.д. К сожалению, их перечень широк [8].

Лидирующими финишными покрытиями являются органическое покрытие, ENIG, ImSn, ImAg и HASL.

Органическое покрытие обеспечивает защиту медной поверхности от окисления в процессе хранения и пайки. Но это покрытие имеет короткий жизненный цикл, что негативно сказывается на технологической надежности.

Покрытие ENIG (4 мкм Ni + 0,1 мкм Au). Это покрытие свободно от ионных загрязнений и способно к многократной пайке при высоких температурах. Функция тонкого слоя золота – защищать никель от окисления, а сам никель служит барьером, предотвращающим взаимную диффузию золота и меди. Покрытие ENIG капризно в выборе флюсов, а его цена примерно на 25 % выше, чем у органического покрытия.

Иммерсионное олово (ImSn) – альтернатива HASL-процессам.

Популярность ImSn растет за счет обеспечения хорошей смачиваемости и простоты процесса осаждения. Покрытие ImSn с барьерным подслоем демонстрирует бесперебойную и лучшую паяемость, чем ENIG.

Иммерсионное серебро (ImAg). Толщина ImAg не превышает 200 нм, поэтому расходы на реализацию этого покрытия незначительны. Жизнеспособность ImAg несколько меньше, чем ENIG.

HASL-процесс горячего облуживания плат состоит в их погружении на ограниченное время в ванну с расплавленным припоем с выравниванием расплавленного припоя на плате горячими воздушными ножами. Тем не менее выравнивание оставляет наплывы до 0,3 мм, что неприемлемо для миниатюрных компонентов поверхностного монтажа.

Полученные данные испытаний позволяют расставить покрытия по их способности к пайке:

- 1) горячее лужение (HASL-процесс);
- 2) иммерсионное олово с барьерным подслоем из органического металла (OM-ImSn);
- 3) иммерсионное золото с подслоем химического никеля (ENIG);
- 4) простое иммерсионное олово (ImSn);
- 5) иммерсионное серебрение (ImAg);

б) органическое защитное покрытие (OSP).

Проблемы производственной инфраструктуры

Проблема, требующая решения, состоит в том, что все производственные помещения, в которых изготавливают печатные платы, должны быть чище, чем в прошлом. В настоящее время для обеспечения приемлемого выхода годных изделий крайне важно, чтобы операции литографии, сборки слоев и нанесения паяльной маски выполнялись в обеспыленной атмосфере с контролируемой температурой и влажностью. Кроме того, было показано, что химические загрязнения воздуха повреждают оборудование для прямого лазерного экспонирования – одного из многообещающих методов удовлетворения потребностям в проводящих рисунках высокой плотности [9].

Проблемы оптических межсоединений

В то время как на коммутационные основания продолжают монтироваться дискретные оптические межсоединения, все больше исследований проводят в направлении изготовления оптических межсоединений групповым способом на одном слое. Уже была показана технологическая возможность монтажа этих групповых слоев на плату, при этом продолжают работы над материалами и процессами создания зеркал, которые могут быть включены в эти слои внутри структуры. Это поможет защитить оптические слои и обеспечить стабильность структуры при длительном сроке эксплуатации.

Исходя из перечисленных проблем рассмотрим пути совершенствования технологических процессов изготовления электрических межсоединений по следующим направлениям.

Фотолитография

Расширяющееся применение прямого формирования рисунков исключает изготовление фотошаблонов и улучшает возможности формирования элементов межсоединений малого размера.

Базовые материалы

Зарубежные поставщики материалов активно стремятся создавать новую и постоянно улучшаемую продукцию, чтобы удовлетворить потребности производителей изделий электроники.

Движущими факторами развития являются потребность в более тонких структурах межсоединений, более высокие частоты и увеличивающаяся плотность компоновки элементов.

Потребности развития высокочастотной электроники приводят к необходимости использования пластинок с меньшими диэлектрическими проницаемо-



стями и тангенсами угла потерь, более высокими температурами стеклования и термодеструкции, лучшими свойствами при температурах пайки и меньшим влагопоглощением. Аналогично, от производителей медной фольги требуется разработка более тонких и гладких материалов и технологий, позволяющих выполнять устойчивое прецизионное травление.

Требования будущего для производителей материалов армирования – более устойчивые электрические свойства, материалы с низкой диэлектрической проницаемостью, более тонкие волокна. Также в будущем потребуются новые высоконадежные финишные покрытия.

Проводники – формирование рисунка, металлизация, травление

Пока еще медь в перспективе удовлетворяет потребности в обеспечении электропроводности и теплопроводности. Существует тенденция, направленная на снижение расхода меди за счет применения аддитивной технологии. Альтернатива – регенерация меди, что создаст замкнутый цикл использования данного ценного металла.

Электрические свойства – импеданс, целостность сигнала

При повышенных частотах требуются лучшие свойства материалов, а повышенные частоты – это данность, с которой придется считаться. Потребуется разработка смол с меньшими значениями диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь.

Паяемость

Непрерывное развитие бессвинцовых технологий требует дополнительных испытаний существующих финишных покрытий. Монтаж без отмычки технологических загрязнений после пайки накладывает дополнительные требования к поверхности плат, не покрытых припоем.

Внедрение новых финишных покрытий плат всегда вызывает новые проблемы, такие как ползучая

коррозия. Даже в проволочной разварке, бывшей в течение долгого времени прерогативой золота, сейчас происходит переход на алюминий и медь, поэтому необходимо провести новые испытания финишных покрытий, которые позволяют выполнять как пайку, так и проволочную разварку.

Производственная инфраструктура

Критичные операции фотолитографии и сборки слоев многослойных структур должны проводиться в чистых производственных условиях.

Технологии встраивания компонентов

Встраивание компонентов внутрь печатных плат (путем формирования или впаивания дискретных компонентов) выдвигает к производителю плат новые требования по тестированию.

Библиографический список

1. **Медведев А.М.** Печатные платы. Конструкции и материалы. М.: Техносфера, 2005. 304 с.
2. **Медведев А.М., Можаров В.А.** Плотность межсоединений электронных компонентов // Печатный монтаж. 2011. № 3.
3. **Семенов П.В., Сержантов А.М., Мылов Г.В.** Печатные платы. Где и как делать? // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 7.
4. **Медведев А.М.** Печатные платы. Базовые материалы // Производство электроники. 2010. № 7.
5. **Медведев А.М.** Печатные платы. Встраивание компонентов // Технологии в электронной промышленности. 2011. № 8.
6. **Шкундина С.Е.** Прецизионное травление печатных плат // Производство электроники. 2011. № 6.
7. **Иванова А.С., Медведев А.М.** Механическое и лазерное формирование отверстий // Печатный монтаж. 2006. № 1.
8. **Медведев А.М., Шкундина С.Е.** Иммерсионные финишные покрытия под пайку // Производство электроники. 2010. № 3.
9. **Медведев А.М., Сержантов А.М., Семенов П.В.** Инженерное обеспечение производства электроники // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 6.

УДК 621.9.06

И.Б. Челпанов, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет),

А.В. Кочетков, д-р техн. наук, профессор (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ООО "Научно-исследовательский центр технического регулирования")
E-mail: soni.81@mail.ru

Нормирование точностных характеристик промышленных роботов

Рассмотрены вопросы совершенствования нормирования точностных характеристик промышленных роботов.

Questions of perfection rationing of characteristics of accuracy of industrial robots are considered.

Ключевые слова: метрология, испытания, робот, схема измерения, точность, качество, сертификация.

Keywords: metrology, tests, robot, measurement scheme, accuracy, quality, certification.

Введение

Точностные характеристики для промышленных роботов (ПР), особенно для операций манипулирования объектами, например при сборке, считаются важнейшими. Еще до начала стандартизации в робототехнике в технические характеристики всегда включалась погрешность (или точность) позиционирования. В 1982 г. показатель точности был введен в ГОСТ 25378–82. В настоящее время в ГОСТ 4.480–87 "Система показателей качества продукции. Роботы промышленные. Номенклатура основных показателей" в качестве единственного показателя точности принята максимальная абсолютная погрешность позиционирования, измеряемая в миллиметрах. Как и все другие нормируемые характеристики, показатель точности должен быть информативным, удобным для практического использования, измеряемым и достаточно просто контролируемым.

Стандартизация показателей точности, форм их представления, методов и способов измерений, по результатам которых вычисляют показатели точности, позволит установить требуемое единство в задании и оценке этих показателей, что необходимо при выработке технических заданий на проектирование, при самом проектировании, оценке технического уровня ПР или при сравнении различных моделей ПР, а

также для получения представления о возможности их применения.

Важность последней задачи возрастает для гибких производственных систем, в которых необходимо согласовывать по точности все взаимодействующие единицы технологического и вспомогательного оборудования.

При применении ПР необходимо обеспечивать правильность и требуемую точность захватывания, перехватывания, установки, базирования и обработки заготовок на всех позициях в условиях, когда при смене номенклатуры или программ необходимо исключать переналадку оборудования.

Постановка задачи

Нормы точности для ПР должны быть согласованы с нормами, установленными в нормативно-технических документах для другого оборудования [1]. Задача согласования существенно усложняется большим разнообразием назначения ПР, поэтому исходную информацию о действующих нормах точности следует получать из документов, относящихся к различным группам оборудования.

Подходы к нормированию показателей точности подробно проработаны для металлорежущих станков. Разработаны, например, ГОСТ 22267–76 "Станки металлорежущие. Схемы и способы измерения геометрических параметров", ГОСТ 8–82 "Станки металлорежущие. Общие требования к испытаниям на точность", а также стандарты более низкого уровня для различных групп станков.

Подходы, разработанные в станкостроении, могут быть непосредственно перенесены на немногие технологические ПР, точность выполнения движений которых прямо отражается на точности изделий. Таковы ПР, предназначенные для механообработки. Однако для большинства технологических ПР прямой контроль показателей точности по параметрам изделий затруднен или практически невозможен.

Для наиболее часто встречающихся операций, выполняемых ПР (например, для шовной и точечной



сварки, нанесения покрытий, сборки), требования к точности движения рабочего органа не могут быть прямо проконтролированы по качеству выполняемых операций. Поэтому для большинства технологических и для всех вспомогательных ПР нормы точности устанавливают только для положения и движения рабочего органа.

Вспомогательные (обслуживающие) ПР функционально не отличаются от другого вспомогательного оборудования. Однако в настоящее время не существуют ни общие подходы к нормированию показателей точности вспомогательного оборудования (в том числе устройств машин и агрегатов, входящих в состав транспортно-накопительных систем), ни комплекты нормативно-технической документации. Показатели точности не нормированы для подающих, загрузочно-разгрузочных и ориентирующих устройств автоматов и автоматических линий, для большинства автооператоров, для манипуляторов с ручным управлением не только в тех случаях, когда их проектируют для работы с конкретным технологическим оборудованием, но и тогда, когда их выпускают серийно как самостоятельные устройства или машины. Лишь для очень немногих видов (например, поворотных столов) разработаны и действуют отраслевые нормы точности.

Нормирование точности подобных устройств значительно облегчается, так как они просты по кинематической схеме, чаще всего имеют одну программируемую координату. Нормирование точности осуществляют независимо для постоянных геометрических величин (определяющих, например, точность базирующих плоскостей, параллельность и перпендикулярность осей, точность ручных установок и пр.) и для воспроизведения требуемых значений по программируемой координате. Если управляемых координат несколько, то точность нормируют независимо по каждой из них.

Другой подход к нормированию точности заключается в том, что требования к точности формулируют для изделия в целом, без разложения этих требований по составным частям. Такой подход развит в комплексе стандартов Государственной системы измерений (ГСИ). В настоящее время он распространен на комплекс стандартов Единой системы стандартов приборостроения (ЕССП).

Предлагаемый метод решения задачи

Вопрос о применимости к ПР ряда положений комплекса стандартов ГСИ, относящихся к средствам измерений, нуждается в обсуждении. Необходимо отметить, что существует самостоятельная группа ПР — измерительные ПР, которые по существу представляют собой средства измерения и контроля. К ним отно-

сят, в частности, измерительные ПР, работающие по принципу координатно-вычислительных машин, но по конструктивному выполнению существенно не отличающиеся от типичных вспомогательных ПР, а также ПР, используемые как носители специальных датчиков, измерительных преобразователей (например датчиков неразрушающего контроля). Представляется, что к таким ПР без всяких изменений применимы положения комплекса стандартов ГСИ. В вопросах нормирования точности многое может быть заимствовано. В первую очередь это относится к классификациям погрешностей по разным признакам.

В ГОСТ 16263–70 введены понятия погрешностей различных видов. Абсолютную погрешность определяют как погрешность измерения, выраженную в единицах измеряемой величины. Систематическую составляющую погрешности определяют как составляющую, остающуюся постоянной или закономерно изменяющуюся при повторных измерениях. Случайную погрешность определяют как составляющую, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях. Для случайной погрешности введено среднее квадратическое отклонение результата измерения. Аналогично определяют погрешности средств измерений, именно им аналогичны погрешности ПР. Основную погрешность средства измерения определяют как погрешность в нормальных условиях; при воздействии влияющих величин к основной погрешности прибавляют дополнительные. Дополнительные погрешности задают через коэффициенты или функции влияния. ГОСТ 8.009–84 устанавливает номенклатуру нормируемых метрологических характеристик средств измерений, определяет их и регламентирует способы представления в нормативно-технической документации.

Стандарт устанавливает основное понятие комплекса нормируемых метрологических характеристик. В конкретных случаях данный комплекс формируют из достаточно полного набора, в который, в частности, входят характеристики случайной погрешности, функции или коэффициенты влияния совокупностей влияющих величин. Тот же стандарт устанавливает способы нормирования и формы представления метрологических характеристик средств измерений. Систематическая погрешность может быть нормирована такими характеристиками, как предел допускаемых значений, среднее значение, среднее квадратическое отклонение. Случайная погрешность может нормироваться пределами допускаемого среднего квадратического отклонения, автокорреляционной функцией и спектральной плотностью. Правила нормирования динамических характеристик средств измерений устанавливает ГОСТ 8.256–77. Принципиальным является то обстоятельство, что нормированы не динамические погрешности, а динамические характеристики, по ко-



торым могут быть расчетом определены динамические погрешности при конкретных законах изменения измеряемой величины. Важной особенностью перечисленных стандартов является раздельное нормирование систематических и случайных погрешностей, их разделение на основные и дополнительные.

ГОСТ 23222–88 устанавливает номенклатуру нормируемых метрологических характеристик средств измерений и точностных характеристик средств автоматизации, способы их нормирования, формы представления и основные требования к методам контроля. Стандарт четко разделяет: метрологические характеристики нормируют для средств измерений, точностные – для приборов и средств автоматизации. Однако по структуре и составу комплекс точностных характеристик полностью подобен комплексу нормируемых метрологических характеристик. Объединение метрологических и точностных характеристик в одном стандарте является удачным прецедентом применения одних и тех же подходов для совершенно различных технических средств.

В стандартах "Роботы промышленные" накопленный опыт нормирования показателей точности практически не используют. В ГОСТ 25686–85 лишь введено неясное и нечеткое определение погрешности позиционирования рабочего органа как отклонение его положения от заданного управляющей программой. Это определение недопустимо хотя бы потому, что при цикловом программном управлении положение подвижных частей часто задается упорами, а не управляющей программой. Очень приблизительное представление о погрешности позиционирования в основном стандарте и отсутствие конкретизации требований к точности ПР в других нормативно-технических документах приводит к тому, что в этой важной области отсутствует единство, в паспортные данные о точности ПР может вкладываться различный смысл, результаты приемосдаточных и контрольных испытаний, проводимых различными методами и по различным методикам, оказываются несопоставимыми.

Отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных, преимущество развиваемого метода по сравнению с существующими

Основные предварительные требования для нормирования точности сводятся к следующему.

1. Необходимо конкретизировать, погрешности каких именно параметров положения необходимо рассматривать. Рабочий орган или объект в захватном устройстве имеет шесть степеней свободы (как жесткое тело), его положение поэтому задают шестью обобщенными координатами – независимыми параметрами. Соответственно погрешность положения рабочего органа или объекта в общем случае задают совокупно-

стью шести величин – погрешностей шести обобщенных координат или параметров положения. Часто удобно задавать условный центр рабочего органа или объекта, тогда в качестве параметров положения вводят три декартовы координаты центра как точки и три угла поворота. Соответственно вводят три составляющие вектора погрешности положения центра по заданным осям и три составляющие вектора малого угла поворота вокруг заданных осей. Нужно говорить о векторе погрешности позиционирования и о векторе погрешности ориентирования, каждый из которых имеет три составляющие. Составляющие погрешностей позиционирования зависят от выбора центра и эта зависимость существенна, если не очень малы погрешности ориентирования. К сожалению, в настоящее время погрешности ориентирования совершенно исключены из рассмотрения, их не нормируют и экспериментально не определяют.

2. Необходимо четко знать, в какой системе координат определяют положение и погрешности. Для любого ПР может быть условно задана базовая система координат, жестко связанная с основанием, однако лишь немногие ПР имеют материально реализованные базы в виде сочетаний участков поверхностей, линий или точек. Эти базы должны быть такими, чтобы можно было определить с требуемой точностью положение основания ПР относительно баз фундамента или баз другого оборудования, а с другой стороны можно было определить положение рабочего органа (в частности, его центра). При наличии материально реализованных баз возможно аналитическое программирование движений, аналогичное программированию движений рабочих органов станков в абсолютных координатах. При отсутствии материально реализованных баз начало отсчета принципиально не определено, и программирование соответствует программированию движений в приращениях.

При наличии баз, когда положения задаются программой (при позиционном или контурном управлении) и действительное положение рабочего органа или объекта сравнивается с задаваемым программой, погрешности позиционирования и ориентирования определяются однозначно и могут быть разделены на систематические и случайные составляющие.

Если не выполнено хотя бы одно условие (отсутствуют базы, датчики обратной связи, а позиционирование осуществляют по упорам), требуемое положение задают при установке и оно не может быть определено однозначно. В этом случае разделение погрешностей на систематические и случайные составляющие невозможно.

3. Необходимо договориться, сколько и какие именно величины подлежат нормированию. Методически наиболее правильно нормировать раздельно



каждую из шести составляющих погрешностей (три составляющие погрешности позиционирования по трем осям и три составляющие ориентирования также по трем осям). Целесообразность независимого нормирования по осям определяется двумя обстоятельствами. Во-первых, составляющие погрешностей по различным осям могут существенно различаться вследствие конструктивных особенностей манипуляторов, способов установки датчиков и т.д. Во-вторых, при эксплуатации ПР на конкретных рабочих местах допустимые отклонения по разным направлениям и углы поворота вокруг разных осей также могут существенно различаться. Так, при установке заготовки в кулачковый патрон допустимые значения поперечных смещений обычно значительно меньше продольных. При сборке пар типа вал–втулка наиболее жесткими являются ограничения по боковым отклонениям и углам перекося. Сопоставление действительных и требуемых различий точности по разным направлениям позволяет обоснованно выбирать ПР и его установку на позиции.

Например, если принят принцип нормирования отдельно составляющих погрешностей по осям, то необходимо обратить особое внимание на выбор осей. Принципиально возможно выбрать единую прямоугольную систему координат, жестко связанную с основанием манипулятора, и в любой точке рабочей зоны (при любых значениях обобщенных координат) определять составляющие погрешностей позиционирования и ориентирования именно по этим осям. При этом достигается единство, выбор осей никак не связан с кинематической схемой манипулятора. Определенных преимуществ достигают также при построении стендов, на которых экспериментально определяют составляющие погрешностей: при переходе от одной точки рабочей зоны к другой комплекс измерительных преобразователей должен перемещаться параллельно самому себе.

Если ПР работает не в прямоугольной системе координат, положения осей кинематических пар в этой системе изменяются. Поэтому в различных точках рабочей зоны вклад погрешности от выдвигания руки в составляющие погрешности позиционирования по различным осям будет различным, что усложняет анализ распределения погрешностей по рабочей зоне. Еще более сложными будут зависимости составляющих погрешности ориентирования.

Иначе получается при проектировании векторов погрешностей на вращающиеся оси, связанные с осями кинематических пар. Каждая из составляющих по осям определяется преимущественно погрешностью по одной координате. Такое разделение открывает возможности экспериментального определения погрешностей при задании перемещений отдельно по обобщенным координатам. Оси для определения со-

ставляющих погрешности ориентирования могут быть иными, чем для погрешностей позиционирования. Есть основания предполагать, что зависимости погрешностей от точек в рабочей зоне будут более простыми при проектировании векторов погрешностей на оси кинематических пар. При этом теряется единство способов нормирования, способ зависит от кинематической схемы манипулятора.

При другом подходе к нормированию рассматривают не составляющие погрешностей по осям, а модули векторов погрешностей позиционирования и ориентирования. При этом не учитывают ни направления, ни знаки погрешностей. Преимущества нормирования модулей векторов погрешностей очевидны: вместо шести величин (составляющих по осям) нужно рассматривать только две. Однако при этом теряется возможность получения информации о направлениях, по которым может быть получена большая точность. Нужно иметь в виду, что модули векторов погрешностей непосредственно не могут быть измерены, измеряют по-прежнему составляющие по осям, а модули векторов рассчитывают по ним. Поэтому первичными данными по-прежнему являются погрешности по осям.

4. После того как сделан выбор погрешности (составляющей по оси или модуля вектора) необходимо задать способ нормирования. В качестве характеристик погрешностей могут быть приняты средние значения, средние квадратические значения, пределы отклонений, определяющие ширину диапазона разброса. Эти нормируемые характеристики следует определять по результатам вычислений, по статистической обработке результатов однократных измерений. В зависимости от того, для каких величин осуществляют нормирование, эти характеристики могут быть рассчитаны как для составляющих по осям, так и для модулей векторов погрешностей. Как отмечалось ранее, разделение погрешностей на систематические и случайные с отдельным их нормированием возможно только для составляющих по осям и лишь при условии, что имеются материально реализованные базы, а программирование движений осуществляют в абсолютных координатах. Более сложные способы нормирования погрешностей, основанные, например, на анализе вида распределений и принятии гипотез о виде распределений с последующим определением параметров, практически возможны лишь при специально поставленных исследовательских испытаниях и в дальнейшем не рассматриваются. Для окончательного выбора нормирования погрешностей целесообразно использовать рекомендации ГОСТ 8.009–84.

5. Для ПР высокой точности важно строго определить, положение какой именно точки характеризует нормируемой погрешностью и для ориентации ка-



кого именно тела определяют погрешность ориентирования. Наиболее приемлемы два пути.

Во-первых, погрешности позиционирования и ориентирования можно определять для конца последнего звена механизма манипулятора или для неподвижной части рабочего органа, которая жестко крепится к последнему звену. Например, на фланце узла крепления рабочего органа выполняют базы (три плоскости или цилиндрическая поверхность и плоскость, или система отверстий). При этом именно этот фланец является телом, для которого определяют погрешности позиционирования и ориентирования. Описанный способ имеет то достоинство, что при нем упрощаются процедуры измерений, однако недостатком является то, что в результате измерений не присутствуют погрешности захватного устройства, которые могут быть существенными.

Во-вторых, погрешности позиционирования и ориентирования можно определять для специального образца, удерживаемого захватным устройством. Образец должен быть базирован в захватном устройстве по всем шести координатам, он также должен иметь совокупность баз, по которым могло быть определено с достаточной точностью его положение. Базирование образца в схвате по шести координатам может представлять определенные трудности, поскольку большинство схватов осуществляет базирование лишь по части координат. Так, угловой схват базирует образец цилиндрической формы только по четырем координатам. В таких условиях для базирования по оставшимся координатам необходимо использовать специальные приспособления. Достоинством такого способа применительно к вспомогательным ПР является то, что показатели точности определяют непосредственно для переносимого объекта. То обстоятельство, что при этом в суммарные погрешности могут вносить существенный вклад такие факторы, как неровности рабочих элементов схвата, погрешности механизма передачи схвата и т.п., следует расценивать положительно.

6. Необходимо учитывать изменения характеристик погрешностей позиционирования и ориентирования в рабочей зоне, т.е. при изменениях обобщенных координат механизма манипулятора. Обычно систематические погрешности и средние квадратические значения случайных погрешностей возрастают при приближении к границам рабочей зоны, но для различных составляющих погрешностей это происходит по-разному. Многократные измерения погрешностей в одной точке не могут дать представления о точности ПР, измерения следует проводить в различных точках и при различной ориентации. Первым встает вопрос о выборе числа и расположения точек, в которых определяют погрешности. По практическим соображениям число точек должно быть ограничено (обычно оно берется в пределах от

четырёх до пятнадцати). Выбор расположения точек зависит от того, каким образом будут объединены результаты измерений погрешностей в разных точках. Иногда высказывается мнение, что желательно получать осредненные показатели точности по всей рабочей зоне. Однако равномерное осреднение по зоне не отражает условия эксплуатации, обычно крайние области зоны используются чаще. При неравномерном осреднении возникает произвол в выборе весовых коэффициентов осреднения. Поэтому более практичным представляется оценка показателей разброса по максимуму, т.е. по значению, максимальному для всех точек. При этом из всех точек, в которых производят измерения, выбирают те, в которых составляющие погрешностей позиционирования и ориентирования максимальны. Точность в этом случае нормируют для наихудших, наименее благоприятных в смысле точности точек. Расположение точек, в которых погрешности предположительно наибольшие, для большинства схем угадывается без труда; могут быть также использованы результаты расчетов на простейших математических моделях манипуляторов. Редко бывает так, что в одной точке максимальны все составляющие погрешностей; обычно в одной точке максимальна одна составляющая, в другой – другая. Поэтому при нормировании по максимуму фактически учитывают несколько точек. Выбор точек в рабочей зоне с максимальными случайными погрешностями не предопределяет способ нормирования. Для случайной погрешности может быть взята или ширина диапазона отклонений, или среднее квадратическое значение. Представляется более естественным использовать именно первую характеристику; при этом результатом нормирования будут максимальные значения погрешностей по всем измерениям и по всем точкам рабочей зоны. Хотя в настоящее время методы нормирования погрешностей ПР не установлены, можно предполагать, что в паспортные показатели точности ПР вкладывается именно такой смысл. Дополнительные погрешности, обусловленные отличиями условий эксплуатации от нормальных, например, отклонениями температуры, в настоящее время не учитывают. В дальнейшем для особо точных ПР, возможно, это окажется необходимым подобно тому, как это делают для особо точных станков.

7. В некоторых случаях предусматривают компенсацию систематических погрешностей, зависящих от массы переносимого объекта и от его координат. Компенсирующие поправки вычисляются в устройстве управления в соответствии с заложенными формульными зависимостями, которые получают обработкой результатов измерений составляющих погрешностей по точкам рабочей зоны с учетом массы переносимого объекта. Для этих случаев необходимо нормировать



также остаточные погрешности, остающиеся после компенсации.

8. Дополнительные трудности возникают при нормировании точностных характеристик модульных ПР. Модуль обычно определяют как унифицированный или нормальный узел, характеризуемый структурной, функциональной и конструктивной самостоятельностью и способный стыковаться с другими узлами (модулями) того же комплекта. В комплект модулей ПР обычно входят различные модули оснований и модули перемещений (линейных поступательных и вращательных). При соединении модулей в различных сочетаниях и различной последовательности получаются разные модификации ПР. В тех случаях, когда имеется базовая модификация, включающая все модули, представляется естественным нормировать точностные характеристики именно для нее.

Модификации, получаемые из базовой путем изъятия некоторых модулей, будут иметь меньшие погрешности, и поэтому принятый способ нормирования дает оценки погрешностей сверху для всех модификаций. Когда таких модификаций, которые содержат больше всего модулей, несколько (например, напольная и подвесная), то точностные характеристики нормируют для них независимо. Однако в тех случаях, когда невозможно выделить базовые, наиболее полные модификации, и в особенности тогда, когда модули имеют по несколько типоразмеров, нормирование точностных характеристик для отдельных модификаций представляется нецелесообразным. Предпочтительным является нормирование точностных характеристик для модулей ПР по отдельности. По этим данным в соответствии с определенными правилами суммирования должны рассчитываться погрешности позиционирования и ориентирования.

Отметим, что в число нормируемых характеристик (показателей качества согласно ГОСТ 4.480–87) вхо-

дят погрешности по степеням подвижности. Однако неясно, какой смысл имеют эти погрешности. Возможно, они являются скалярными величинами и для механизмов поступательных степеней подвижностей определяют только линейные погрешности по осям соответствующих кинематических пар, а для механизмов вращательных степеней подвижности – погрешности углов поворота вокруг кинематических пар. При такой трактовке задачи измерения погрешностей достаточно просты.

Например, если приводы имеют датчики линейных перемещений или углов поворота, то погрешности могут быть определены по их сигналам; при недостаточной точности датчиков приводов параллельно с ними по тем же осям должны быть установлены специальные измерительные датчики. Измерения могут производить как на модулях, установленных отдельно на стендах, так и на модулях в составе собранной модификации ПР (если ПР не модульного типа, то реально возможен второй путь). Следует иметь в виду, что знание только линейной погрешности по оси кинематической пары или погрешности угла поворота для каждого модуля не дает возможности рассчитывать погрешности модификации ПР, получаемой соединением модулей.

Вывод

В данной работе определены методические подходы к нормированию точностных характеристик промышленных роботов, в том числе для ориентирующих степеней свобод.

Библиографический список

1. Колпашников С.Н., Тимофеев А.В., Челпанов И.Б. Стандартизация промышленных роботов. М.: Изд-во Стандартов, 1990.

УДК 621.313

А.А. Герасин, канд. экон. наук

(Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва),

Ф.Р. Исмаилов, И.Х. Хайруллин, д-ра техн. наук, **В.Е. Вавилов, М.М. Зюков**, аспиранты

(Уфимский государственный авиационный технический университет)

E-mail: s2_88@mail.ru

Имитационная модель электромеханических преобразователей энергии с учетом процессов в подшипниковых опорах

Решена задача определения влияния параметров подшипниковых узлов с учетом изменения температуры в процессе эксплуатации на электромеханические и электромагнитные характеристики высокоскоростных электромеханических преобразователей энергии, для которых в программном комплексе Matlab Simulink разработаны имитационные компьютерные модели на механических подшипниках и гибридных магнитных подшипниках.

Solve the problem of determining the effect of the parameters of the bearing assemblies for the changes in temperature during operation in electromechanical and electromagnetic characteristics of high-speed electromechanical energy converters, for which in the programs Matlab Simulink complex simulation computer models on mechanical bearings and hybrid magnetic bearings are developed.

Ключевые слова: гибридный магнитный подшипник, высокоскоростной электромеханический преобразователь энергии, Matlab Simulink.

Keywords: hybrid magnetic bearing, high speed electromechanical energy converter, Matlab Simulink.

Имитационное моделирование является наиболее наглядным методом исследования процессов в электромеханических преобразователях энергии (ЭМПЭ), получившим широкое распространение в последнее время. Отечественными и зарубежными авторами [1–3] разработаны имитационные математические модели различных типов ЭМПЭ: синхронных, асинхронных, линейных и т.д. Эти модели предназначены для исследования электромеханических и электромагнитных процессов в активной системе ЭМПЭ и не учитывают процессы, происходящие в подшипниковых опорах [1, 2] или учитывают их введением постоянного коэффициента трения [3]. Данный подход к имитационному моделированию может применяться в ЭМПЭ

с частотой вращения ротора не более $10\,000\text{ мин}^{-1}$, так как в данном случае подшипниковые опоры нагружены незначительно, а следовательно, имеют минимальное трение, которое препятствует вращению ротора ЭМПЭ. В быстроходных ЭМПЭ (частота вращения ротора $30\,000\text{...}100\,000\text{ мин}^{-1}$) трение в подшипниковых опорах может достигать значительных величин и препятствовать вращению ротора. Следовательно, при разработке имитационной модели быстроходных ЭМПЭ необходимо учитывать процессы изменения коэффициента трения в подшипниковых опорах.

Целью данной работы является разработка имитационной модели ЭМПЭ, учитывающей изменения коэффициента трения в подшипниковых опорах, и исследование влияния типа подшипниковых опор на электромагнитные характеристики ЭМПЭ.

Для выполнения поставленной цели выполнены:

- разработка математической модели, отражающей взаимозависимость электромагнитных характеристик ЭМПЭ и механических характеристик в подшипниковых опорах;
- реализация разработанной математической модели в системе Matlab Simulink;
- исследования методами имитационного моделирования взаимозависимости электромеханических характеристик ЭМПЭ от процессов в подшипниковых опорах.

За основу при математическом моделировании была принята математическая модель синхронного ЭМПЭ во вращающихся координатах d, q [4]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}i_d &= \frac{1}{L_d}u_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega i_q; \\ \frac{d}{dt}i_q &= \frac{1}{L_q}u_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}p\omega i_d - \frac{p\omega\psi}{L_q}; \\ M_c &= 1,5p[\psi i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]; \\ \frac{d}{dt}\omega &= \frac{1}{J}(M_m - k_{тр}\omega - M_c), \end{aligned} \quad (1)$$

где i_d, i_q – проекции токов статора на оси q и d ;



L_d, L_q – проекции индуктивности на оси q и d ;
 u_d, u_q – проекции напряжений, подводимых к статору, на оси q и d ;

R – активное сопротивление обмотки ЭМПЭ;

p – число пар полюсов;

ω – частота вращения ротора;

ψ – потокосцепление фазы статора;

M_e – электромагнитный момент;

J – момент инерции;

M_m – механический момент привода;

$k_{тр}$ – коэффициент трения качения, учитывающей трение в подшипниках.

При этом принимают, что в ЭМПЭ используют только подшипники качения.

Тогда коэффициент трения качения определяется в виде [5]

$$k_{тр} = \frac{k \sigma^{0,02} \left[\frac{HB Ra}{E^2 R_{пр}} \right]}{\gamma^{0,07} v^{0,2} v_{\Sigma k}^{0,12}}, \quad (2)$$

где k – размерный коэффициент, $k = 472,5$;

σ – максимальное контактное давление по Герцу, МПа;

HB – твердость по Бринеллю менее твердого из контактирующих материалов, МПа;

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля шероховатостей поверхности более твердого тела, м;

E – приведенный модуль упругости материалов, МПа;

$R_{пр}$ – приведенный радиус кривизны, м;

γ – вязкость смазочного материала при температуре вступающих в контакт поверхностей, m^2/c ;

v – скорость скольжения, м/с;

$v_{\Sigma k}^{0,12}$ – суммарная скорость качения, м/с.

При определении коэффициента трения необходимо учитывать изменение кинематической вязкости смазки, определяемую по формуле Вальтера [6]:

$$\lg [\lg(\gamma + 0,8)] = k_1 - k_2 \lg T, \quad (3)$$

где γ – кинематическая вязкость смазочного материала в момент времени t ;

k_1, k_2 – эмпирические коэффициенты;

T – температура воздуха в момент времени t .

Тогда с учетом формулы (3) математическая модель синхронного ЭМПЭ с учетом процессов в подшипниковых узлах определяется в виде

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega i_q;$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega i_d - \frac{p \omega \psi}{L_q};$$

$$M_e = 1,5 p [\psi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]; \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} \left\{ M_m - \left[\frac{k \sigma^{0,02} \left(\frac{HB Ra}{E^2 R_{пр}} \right)}{(10^{10 k_1 - k_2 \lg T})^{0,07} v^{0,2} v_{\Sigma k}^{0,12}} \right] \omega - M_e \right\}.$$

Таким образом, выражение (4) является математической моделью, описывающей взаимозависимость электромеханических, электромагнитных, тепловых и механических процессов в ЭМПЭ на подшипниках качения.

Ввиду высоких частот вращения ($30\ 000 \dots 100\ 000 \text{ мин}^{-1}$) в быстроходных ЭМПЭ для увеличения надежности применяют гибридные магнитные подшипники (ГМП) [7]. В связи с этим важной научно-технической задачей является разработка математической моделью описывающей взаимозависимость электромеханических, электромагнитных, тепловых и механических процессов в ЭМПЭ на ГМП.

Для решения данной задачи необходимо определить коэффициент трения в ГМП.

В зазоре ГМП возникает сила вязкого трения между воздушным зазором и вращающейся частью, которую определяют из формулы

$$F_{в.т} = \frac{\gamma S \pi D n}{\delta}, \quad (5)$$

где S – площадь контакта, m^2 ;

D – диаметр вращающейся части, м;

n – частота вращения ротора, мин^{-1} ;

δ – воздушный зазор, м;

m – масса ротора с ГМП, кг;

F_r – сила отталкивания ГМП, Н.

Кинематическая вязкость воздуха γ в момент времени t и в зависимости от температуры определяется в виде [8]

$$\gamma = \gamma_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (6)$$

где γ_0 – кинематическая вязкость воздуха в момент пуска генератора;

T_0 – температура воздуха в воздушном зазоре в момент запуска генератора;

C – постоянная Сазерленда;

T – температура воздуха в момент времени t .

Тогда коэффициент трения ГМП

$$k_{тр} = \frac{\gamma_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} S \pi D n}{\delta (m g + F_r)}. \quad (7)$$



С учетом формулы (7) математическая модель ЭМПЭ на ГМП определяется в виде

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_d &= \frac{1}{L_d} u_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega i_q; \\ \frac{d}{dt} i_q &= \frac{1}{L_q} u_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega i_d - \frac{p \omega \psi}{L_q}; \\ M_c &= 1,5 p [\psi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]; \\ \frac{d}{dt} \omega &= \frac{1}{J} (M_m - \left[\frac{\gamma_0 \frac{T_0 + C}{T + C} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} S \pi D n}{\delta (mg + F_r)} \right] \omega - M_c). \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом выражение (8) является математической моделью, описывающей взаимозависимость электромеханических, электромагнитных, тепловых и механических процессов в ЭМПЭ на ГМП.

Разработанные математические модели (4) и (8) реализуют в программном комплексе Matlab Simulink для исследований методами имитационного моделирования взаимозависимости электромеханических характеристик ЭМПЭ от процессов в подшипниковых опорах. Имитационные модели представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Для определения взаимозависимости электромеханических характеристик ЭМПЭ от процессов в подшипниковых опорах было произведено компьютерное моделирование с использованием упомянутых

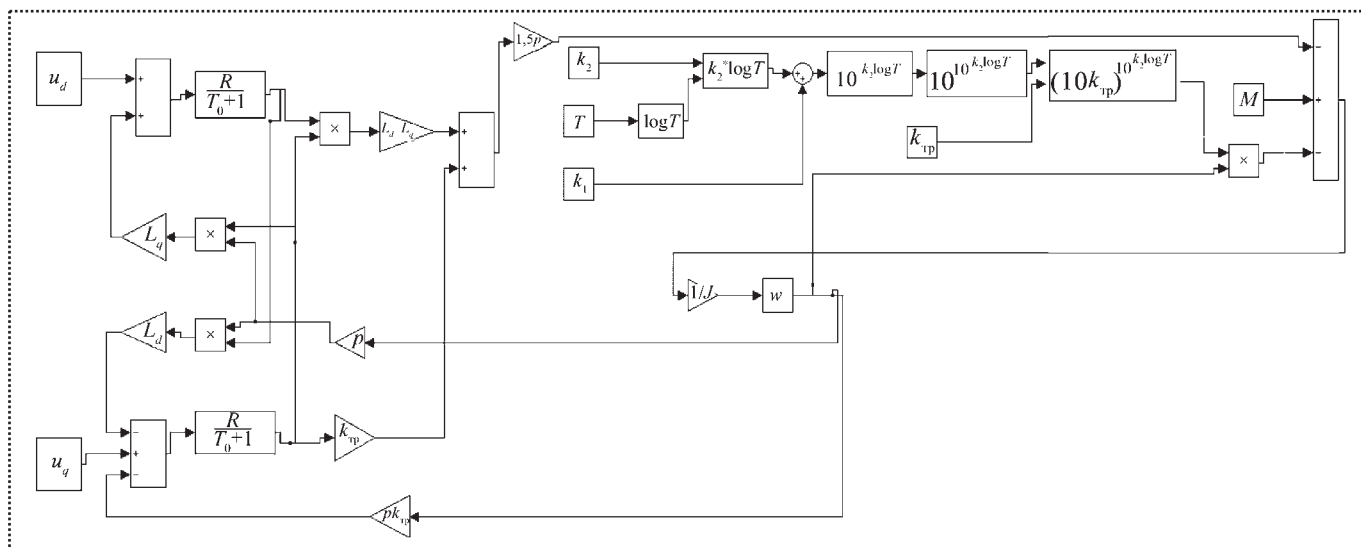


Рис. 1. Имитационная модель ЭМПЭ на подшипниках качения:

× – произведение элементов; + – сумматор (операция суммирования); F_0 – коэффициент, учитывающий трение в подшипниках

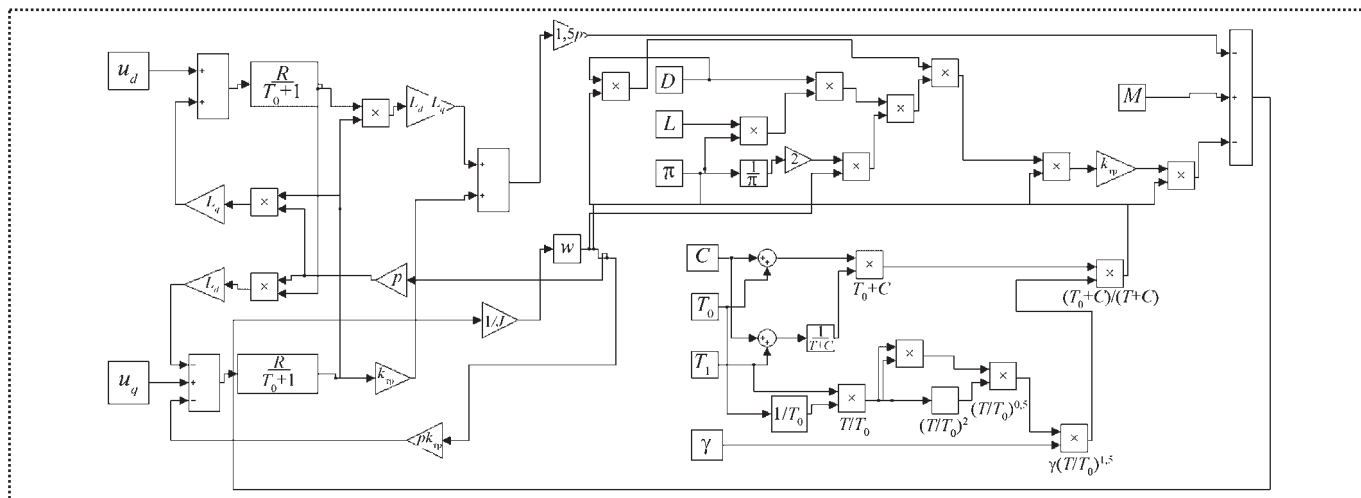


Рис. 2. Имитационная модель ЭМПЭ на ГМП

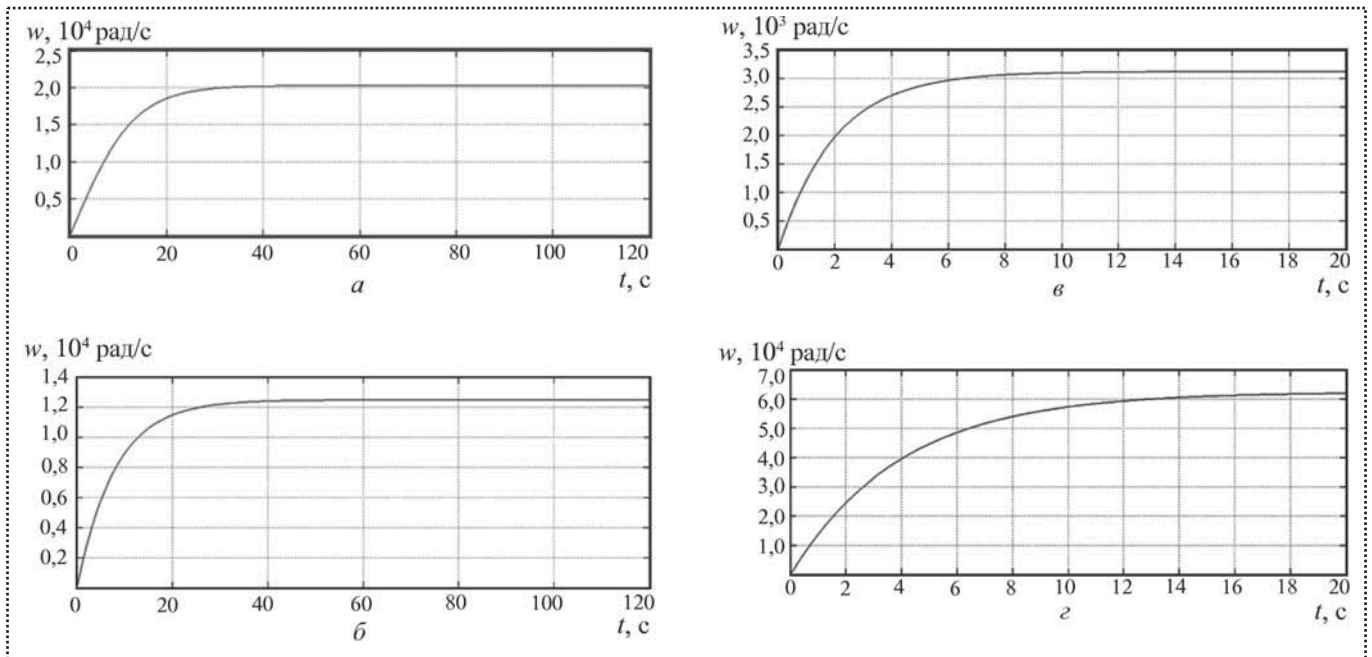


Рис. 3. Зависимость угловой скорости ротора w от времени t для:

a – ЭМПЭ на ГМП; $б$ – ЭМПЭ на радиальных шариковых подшипниках; $в$ – ЭМПЭ на радиальных конических роликовых подшипниках; $г$ – ЭМПЭ на радиальных шариковых сферических подшипниках

имитационных моделей ЭМПЭ с пятью типами подшипников при одинаковых температурных условиях. На выходе имитационных моделей снимались характеристики зависимости частоты вращения от времени

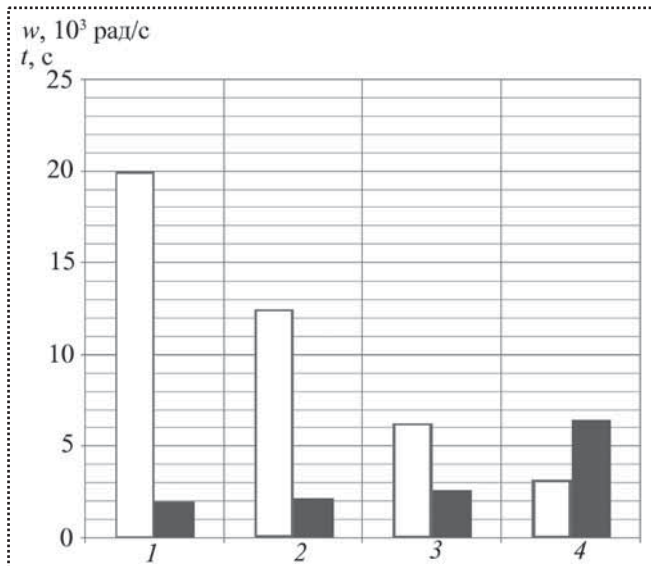


Рис. 4. Зависимость скорости вращения от времени разгона ЭМПЭ до 3000 рад/с и от типа подшипниковых опор:

1 – ГМП; 2 – шариковые; 3 – шариковые сферические; 4 – конические роликовые;
 □ – угловая скорость w ;
 ■ – время разгона до скорости $w = 3000$ рад/с

(рис. 3). Параметры ЭМПЭ при моделировании принимали следующими: ЭМПЭ синхронного типа с напряжением по оси $q u_q = 30$ В и приводным моментом $M_M = 25$ Н м.

Сравнительный анализ зависимостей показал, что электромагнитные характеристики ЭМПЭ зависят от типа подшипниковых опор. При применении радиальных шариковых подшипников максимальная развиваемая угловая скорость ЭМПЭ составляет 12 000 рад/с, что на 35 % меньше, чем в ЭМПЭ на ГМП, на 50 % больше, чем в ЭМПЭ на шариковых сферических подшипниках и 75 % больше, чем в ЭМПЭ на конических роликовых подшипниках.

Таким образом, увеличение максимальной скорости вращения в ЭМПЭ при применении ГМП приведет к увеличению мощности ЭМПЭ с сохранением или незначительным увеличением массогабаритных показателей.

Также анализ зависимостей показал, что от типа подшипниковых опор зависит быстродействие ЭМПЭ (рис. 4), т.е. снижается время разгона ЭМПЭ до номинальной частоты вращения, что является весьма важным для ряда областей промышленности, например для авиационных ЭМПЭ. В качестве номинальной угловой скорости была определена угловая скорость 3000 рад/с. При применении ГМП время разгона ЭМПЭ до номинальной скорости на 8,5 % меньше, чем при применении шариковых подшипников, на 32,14 % меньше, чем при применении шариковых сферических подшипников.



ковых сферических подшипников и в 3,2 раза меньше, чем при конических роликовых подшипниках.

Таким образом, в работе разработаны математические и имитационные модели ЭМПЭ, отражающие взаимозависимость их электромагнитных характеристик от процессов в подшипниковых опорах. Исследованы характеристики ЭМПЭ при различных типах подшипников. Полученные результаты могут быть использованы на практике при проектировании электромеханических преобразователей энергии.

Библиографический список

1. Герман-Галкин С.Г., Кардонов Г.А. Электрические машины: лабораторные работы на ПК. СПб.: Корона принт, 2003. 256 с.
2. Нестерин В.А. Имитационная математическая модель вентильного индукторного генератора комбинированного возбуждения // Электротехника. 2006. № 2. С. 41–45.
3. Волокитина Е.В., Никитин В.В., Опалев Ю.Г., Тебеньков Ф.Г. Имитационная математическая модель синхронной

магнитоэлектрической машины в генераторном режиме в среде Matlab Simulink // Электроника и электрооборудование транспорта. 2011. № 5. С. 23–27.

4. Герман-Галкин С.Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб: Корона-Век, 2008. 368 с.

5. Перель Л.Я. Подшипники качения: расчет, проектирование и обслуживание опор: справочник. М.: Машиностроение, 1992. 606 с.

6. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Кудинов С.И. Новый метод определения высокотемпературной кинематической вязкости моторных масел // Двигателестроение. 2009. № 2. С. 53–54.

7. Герасин А.А., Исмаилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Особенности применения гибридных магнитных подшипников в быстроходных магнитоэлектрических машинах // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/105-6935> (дата обращения: 03.09.2012).

8. НПО "Промышленный привод". URL: <http://npopp.com/hydraulic/physics/hsd-121.html> (дата обращения 10.11.2011).

Читайте в следующем номере:



- ✓ Кристаль М.Г., Гольцов А.С., Плешаков А.А., Полякова М.В. Устройство для контроля размеров сопрягаемых поверхностей при сборке коронок для перфораторного бурения
- ✓ Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка меди и ее сплавов
- ✓ Доронина Ю.В., Копп В.Я. Построение и развитие системы контроля качества изделий сборочного производства
- ✓ Бойкачëв В.Н., Хоменко В.В. Разработка основных принципов интегрированного управления качеством конструкторско-технологических решений на всех стадиях жизненного цикла радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов
- ✓ Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Выбор полей допусков сопрягаемых параметров при селективной сборке изделий типа "вал–втулка"

MASHEX-2012

С 22 по 25 октября в павильоне "Форум" ЦВК "Экспоцентр" проходила 15-я международная специализированная выставка оборудования, комплектующих, материалов, технологий и услуг для металлообработки и машиностроения.

Выставка организована ЗАО "МВК" в партнерстве с ЗАО "Экспоцентр", при поддержке Российской ассоциации "Станкоинструмент", Торгово-промышленной палаты РФ и других организаций.

Прошедшая выставка состояла из следующих основных разделов:

- кузнечно-прессовое оборудование;
- оборудование для обработки металлов давлением;
- гидравлика (приводы, двигатели);
- контрольно-измерительные приборы;
- станки и инструменты для покрытий и обработки поверхностей;
- комплектующие изделия и материалы, в том числе для сборочного производства;
- литейные и формовочные машины;
- термообработка;
- CAD/CAM (PLM);
- инструменты;
- ремонт и модернизация оборудования;
- лазерные установки;
- промышленные работы.

В выставке приняли участие 145 компаний из 9 стран, в том числе и из России. Экспозиционная площадь выставки 3200 м².

Рассмотрим краткое описание оборудования и технологий, демонстрировавшихся на выставке, предложений предприятий-разработчиков и сбытовых организаций, касающихся применения этого оборудования в сборочном производстве.

Компания "Рязанский инжиниринговый центр Станко" предложила предприятиям машиностроительной отрасли станки ЗАО "Рязанский завод токарных станков".

Трубнонарезной станок с ЧПУ мод. РТН46Ф3 (рис. 1) используется для нарезания различных типов цилиндрических и конических трубных резьб. Этот станок также можно использовать как станок с ЧПУ для обработки резанием тел вращения. Благодаря широкому направляющим двойной шлифовке, закалке и старению имеет высокую

жесткость и сохраняет высокую точность в течение всего периода эксплуатации станка. Конструкция передней бабки с закаленными и отшлифованными шестернями, шпинделем большого диаметра и высокоточными подшипниками повышенной нагрузочной способности имеет избыточную жесткость для поддержания режимов силового резания и финишной обработки. Централизованная смазка станка осуществляется в автоматическом режиме. Тефлоновое покрытие направляющих каретки уменьшает коэффициент трения и повышает плавность хода на малых подачах. Предельные размеры обрабатываемой заготовки; диаметр над станиной 1250 мм, диаметр над суппортом – 900 мм. Диаметр цилиндрического отверстия в шпинделе бабки 465 мм. Минимальная подача по осям Z и X составляет 0,001 мм. Габаритные размеры станка 4800×6300×8300 мм, масса 13 т.

Радиально-сверлильный станок мод. Z3063x20A создан в соответствии с международным качеством ISO. На станке применены: гидравлическое переключение скоростей и подач, гидравлический прижим шпиндельной бабки, рамы и колонны. Переключение прямого и обратного вращения шпинделя, торможение шпинделя, а также перевод шпинделя в нейтральное положение осуществляется одним рычагом управления.

На станке можно производить: сверление, кольцевое сверление, развертывание, нарезание резьбы метчиком и растачивание. Максимальный диаметр сверления 63 мм. Пределы растачивания между торцом шпинделя и рабочей поверхностью стола: максимальное 1600 мм, минимальное 400 мм. Осевое перемещение шпинделя 400 мм, частота его вращения 20...1600 мин⁻¹. Мощ-

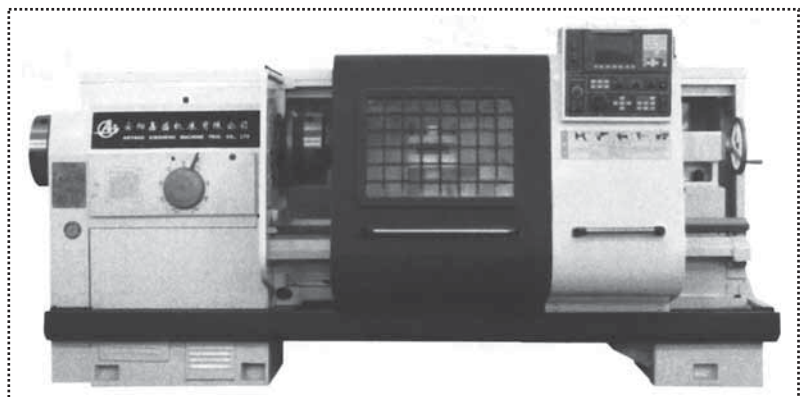


Рис. 1. Трубнонарезной станок с ЧПУ мод. РТН46Ф3

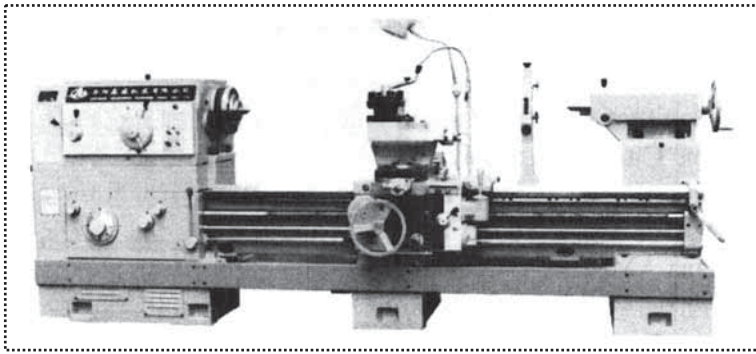


Рис. 2. Универсальный токарно-винторезный станок мод. 1N65B

ность двигателя главного привода станка 5,5 кВт, габаритные размеры 3110×1250×3150 мм, масса 8 т.

Универсальный токарно-винторезный станок мод. 1N65B (рис. 2) горизонтальной компоновки предназначен для токарной обработки внутренних и внешних цилиндрических и конических поверхностей, обработки торцев, а также для нарезания метрических, дюймовых, модульных и питчевых резьб. Станок также можно использовать для прорезки масляных канавок и шпоночных пазов. Боковые стенки станины выполнены в форме коробчатой структуры с двойными ребрами жесткости, что увеличивает жесткость станка, стабильную точность обрабатываемых изделий и возможность силового резания. Фартук станка оснащен механизмом ускоренного перемещения каретки и ползушки. Торможение и реверс шпинделя осуществляется гидравлической муфтой. Для улучшения скольжения на малых подачах направляющие каретки армированы тефлоновым покрытием. Предельные размеры обрабатываемой заготовки: диаметр над станиной до 940 мм, диаметр над суппортом 660 мм, диаметр в выемке станины до 1140 мм, наибольшая длина обработки до 9850 мм. Пределы частот вращения шпинделя 6...800 мин⁻¹. Наибольшее поперечное перемещение каретки 570 мм. Мощность главного двигателя станка 11 кВт.

Токарный станок с ЧПУ мод. СУ-К52 с наклонной станиной предназначен для выполнения черновой и чистовой токарной обработки, выполнения операций тонкого и финишного точения, сверления, расточки, чистовой обработки отверстий, нарезания резьбы, выполнения фрезерных операций на деталях различной конфигурации. Угол наклона станка 45°. Основные узлы станка изготовлены из высококачественного чугуна. Направляющие станка закалены и отшлифованы. Широкие смотровые окна позволяют оператору наблюдать за технологическим процессом обработки. Наибольший диаметр обрабатываемой заготовки: над станиной 520 мм, над суппортом 320 мм;

пределы частот вращения шпинделя 30...3000 мин⁻¹; мощность главного двигателя 15 кВт; ЧПУ мод. Janus Oi-mate-TD. Наибольшее перемещение суппорта составляет: по оси Z – 590...1050 мм, по оси X – 220 мм. Наибольшая масса обрабатываемой заготовки: в патроне 200 кг, в центрах до 1 т. Габаритные размеры станка 4000×2000×2300 мм, его масса 4,65 т. Станок оснащен 12-позиционной револьверной головкой, работающей в автоматическом режиме и кондиционером для охлаждения электрошкафа.

Токарный станок с ЧПУ горизонтальной компоновки мод. СУ-К660 предназначен для высокопроизводительной черновой и чистовой обработки цилиндрических, ступенчатых, конических, фасонных поверхностей деталей среднего и крупного размера из чугуна, стали и цветных металлов. Шпиндель станка смонтирован на трех высокоточных подшипниковых опорах; все зубчатые колеса передней бабки закалены, отшлифованы и прикатаны, что способствует плавной передаче вращения и низкому уровню шума. Для перемещения по осям Z и X используются высокоточные шарико-винтовые пары. Широкие тумбы станка в сочетании с трапецеидальным сечением станины обеспечивают силовое резание и высокую точность финишной обработки. Независимый привод шпинделя, отделенный от коробки скоростей, обеспечивает высокую термостабильность станка. Двигатель главного привода мощностью 11 кВт частотно регулируемый. Широкие смотровые окна позволяют оператору наблюдать за технологическим процессом обработки. Станок может быть оснащен функцией Teach-In (обучение станка с первоначальной обработкой детали с помощью электронных маховиков управления по осям Z и X). Максимальный диаметр обрабатываемой заготовки: над станиной 660 мм, над суппортом 365 мм. Пределы частот вращения шпинделя 35...2000 мин⁻¹. Точность позиционирования суппорта: по оси Z – 0,045 мм, по оси X – 0,03 мм. Станок оснащен системой ЧПУ мод. Janus Oi-mate-TD. Его габаритные размеры 3700×2100×2200 мм, масса 3,1 т.

ООО "Плазмаш" (г. Москва) – лидер в области разработки, производства и поставки оборудования для воздушно-плазменной и газокислородной резки металлов демонстрировало свою продукцию. Приведем краткое описание лишь некоторых экспонатов.

Аппарат воздушно-плазменной резки металлов мод. ПУРМ-400В (рис. 3) – мощный аппарат для разделительной резки металлов и сплавов толщиной до 100 мм. Аппарат оснащен автономной системой охлаждения плазматрона водой. Наличие двух режимов

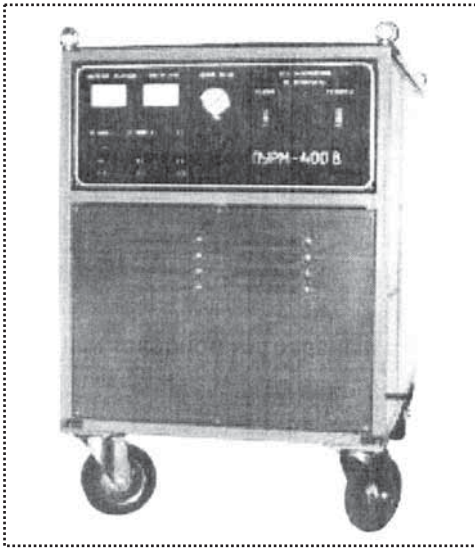


Рис. 3. Аппарат воздушно-плазменной резки ПУРМ-400В

работы (половинной и полной мощности) позволяет экономить электроэнергию. Напряжение питающей сети аппарата 380 В. Максимальная потребляемая мощность: I режим – 30 кВт, II режим – 60 кВт; расход воздуха при работе аппарата 160...240 л/мин. Габаритные размеры аппарата 1020×600×940 мм, его масса 440 кг.

Переносная машина термической резки мод. "Грань" (рис. 4) предназначена для прямолинейного раскроя листового металлопроката на полосы. Машина имеет:

- ходовую часть;
- шкаф управления;
- пульт управления;
- комплект для газокислородной резки;
- направляющую длиной 2,4 м;
- штангу с державками.

Направляющая машины имеет обратные планки и поджимные ролики, что гарантирует высокую жесткость конструкции и качество торцевой поверхности реза. Скорость перемещения резака (15...4800 мм/мин) позволяет использовать газокислородную и плазменную резку металлов. Машину можно использовать в полевых условиях и в условиях промышленных предприятий. Толщина листа разрезаемого машиной: плазменная технология – 1...70 мм, газокислородная технология – 5...200 мм, ширина нарезаемых полос – 30...540 мм. Рабочий ход машины 2000 мм, число газовых резаков 2 шт., напряжение питающей сети 220 В, потребляемая мощность 0,4 кВт. Габаритные размеры: ходовой части 750×320×270 мм, шкафа управления

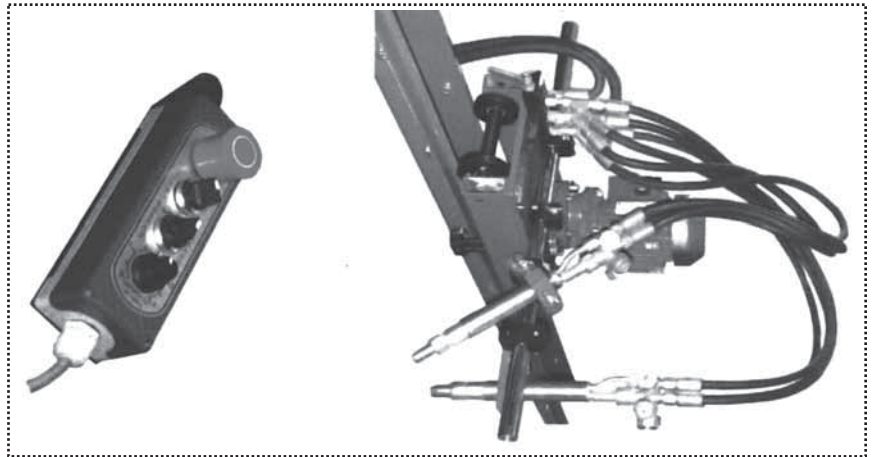


Рис. 4. Переносная машина термической резки мод. "Грань"

400×300×220 мм. Масса ходовой части 16 кг, шкафа управления – 9 кг.

Консольная машина термической резки металлов с ЧПУ мод. "Магнит-CNC" (рис. 5) предназначена для раскроя листового металлопроката по заданным чертежам с использованием системы ЧПУ. Блок ЧПУ имеет жидкокристаллический индикатор на 32 символа (2 строки по 16 символов в каждой) и мембранную клавиатуру на 16 клавиш (10 цифровых и 6 функциональных). Машина имеет продольную направляющую, по которой движется каретка с установленной на ней поперечной траверсой. Также машина может быть оснащена системой автоматического слежения за расстоянием между резаком и разрезаемым листом, что позволяет осуществлять резку покоробленных листов. Основное назначение машины – фигурная вырезка деталей по заданной программе, записанной в памяти тер-

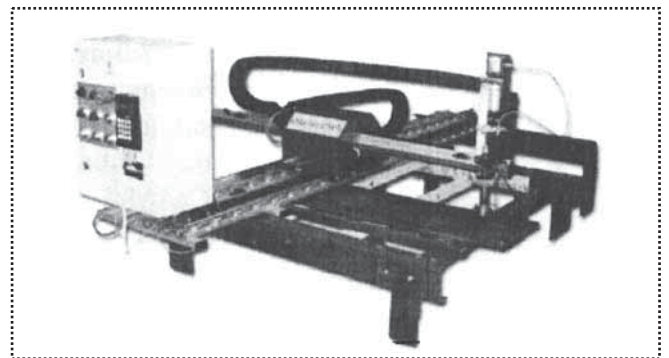
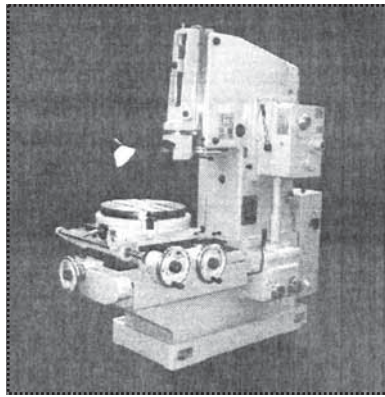


Рис. 5. Машина переносная термической резки металла с ЧПУ "Магнит-CNC"



Рис. 6. Долбежный станок ГД200-1 с механическим приводом



минала ЧПУ. Рабочая зона машины 1000×2000 мм, точность воспроизведения контура $\pm 0,35$ мм, скорость рабочих подач – до 3000 мм/мин. Толщина разрезаемого листа: по газовой технологии 5...100 мм, по плазменной технологии 1...70 мм.

ОАО "СтанкоГомель" им. С.М. Кирова предложило потребителям свою продукцию.

Долбежный станок мод. ГД 200-01 (рис. 6) предназначен для изготовления шпоночных пазов, шлицев и канавок на фасонных и плоских поверхностях. Рабочий ход долбяка 20...200 мм. Расстояние от плоскости рабочего стола до нижней поверхности направляющих долбяка 320 мм. Наибольшая высота обрабатываемого изделия при обработке поверхности: наружной 300 мм, внутренней 100 мм. Скорость долбяка под нагрузкой 15, 66 и 101 двойных ходов/мин. Перемещения рабочего стола: продольное 500 мм, поперечное 400 мм, круговое 360°. Мощность главного привода станка 3,6 кВт, его габаритные размеры 1900×1270×2175 мм, масса 2 т.

Станок для механической обработки торцов труб мод. СПК141А (рис. 7) предназначен для снятия фасок и зачистки наружной и внутренней поверхности труб, примыкающих к торцу перед автоматической сваркой. Диаметр обрабатываемых труб до 1420 мм при толщине стенки 16...23 мм. Частота вращения планшета 22,4 мин⁻¹, при подаче 0,15 мм/об, наибольшая величина хода 130 мм. Давление в гидросистеме центрактора 10 МПа. Мощность электродвигателей: главного привода 11 кВт, привода подач 0,75 кВт, гидропривода 3 кВт. Габаритные размеры станка 3520×1650×2250 мм, его масса 5 т.

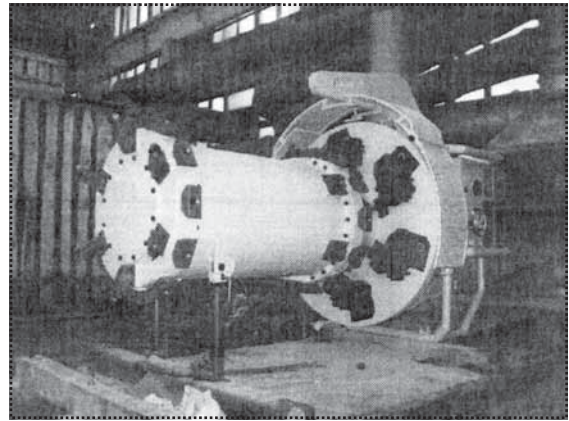


Рис. 7. Станок СПК141 для механической обработки торцов труб магистральных трубопроводов

Правильно-отрезной автомат мод. ГД 162-01 (рис. 8) служит для быстрой правки и мерной резки гладкого и арматурного проката в заготовительном производстве. Автомат работает следующим образом. Бухта устанавливается на разматывающее устройство, с которого материал подается во вращающуюся правильную рамку, где в результате многократного знакопеременного изгиба выправляется и после отрезки на заданную длину падает в накопитель. Диаметр выправляемого и отрезаемого проката: гладкого профиля – наименьший 5 мм, наибольший 16 мм; периодического профиля – наименьший 5 мм, наибольший 12 мм. Длина отрезаемого проката: наименьшая 100 мм, наибольшая 9000 мм. Скорость правки 30; 45; 60 и 90 м/мин. Частоты вращения правильной рамки – 1000 и 2000 мин⁻¹. Мощность электродвигателя главного привода 7,5 кВт. Габаритные размеры автомата 19 500×4000×2000 мм, его масса 4,7 т. Простота заправки обрабатываемого материала, несложность переналадки при резке различных диаметров и на

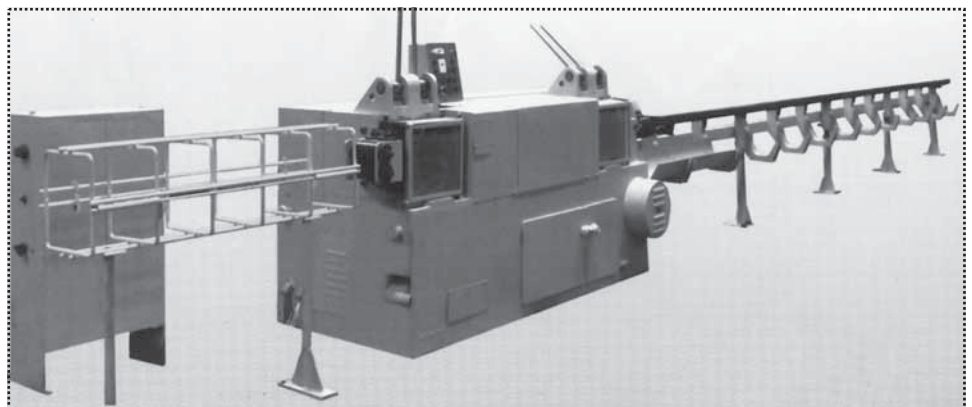


Рис. 8. Правильно-отрезной автомат мод. ГД 162-01

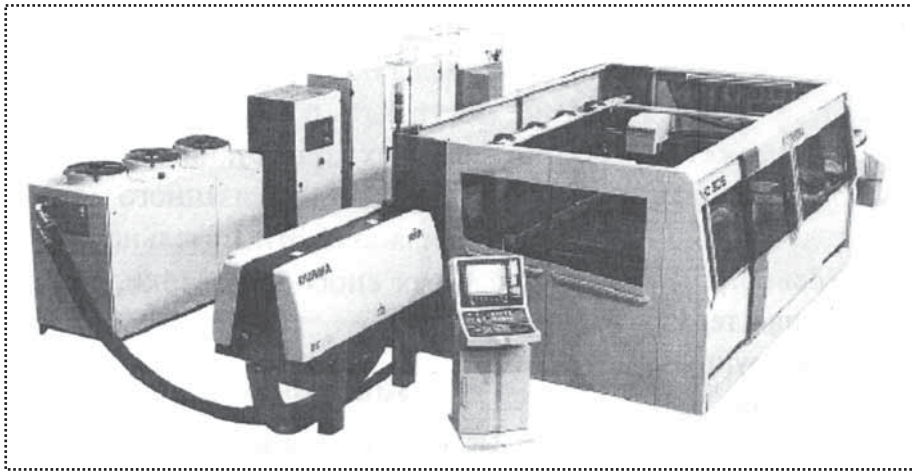


Рис. 9. Установка лазерной резки DURMA HD

разную длину, высокая скорость подачи и удобство обслуживания обеспечивают большой экономический эффект при работе автомата.

Компания "Индустрия успеха" (г. Нижний Новгород) – официальный представитель в России ведущих европейских и азиатских производителей оборудования для металлообработки – демонстрировала на выставке различное оборудование.

Установка лазерной резки DURMA серии HD-F (рис. 9) оснащена оптоволоконными лазерами мощностью 4 кВт с длиной волны 1,07...1,08 мкм, созданными из активных оптических волокон и полупроводниковых диодов. Испускаемый лазерный луч передается по гибким усиленным кабелям. Система позволяет получать очень яркий свет с отличным качеством луча. Лазер сочетает в себе низкие эксплуатационные расходы и абсолютное соответствие рассеивания пучка и его профиля на всех уровнях мощности. Отражение лазерного луча почти нулевое, что необходимо для того, чтобы резать цветные металлы, такие как медь и латунь с низкими энергетическими затратами и с высокой эффективностью. Установка может обрабатывать (резать) сталь толщиной 18...20 мм, коррозионно-стойкую сталь или алюминий толщиной 10 мм.

Ленточная пила мод. ДСВ-А1100 предназначена для прямой и угловой резки железа, медных и алюминиевых сплавов, углеродистой стали, горячехолодной инструментальной стали, улучшенной стали, рельефной стали, хромо-никелевой легированной стали, подшипниковой стали, коррозионно-стойкой стали, титановых сплавов, литья, конструкционной стали и цветных металлов. Отличительными особенностями ленточнопильных станков является прочная сварная станина, пыльная рама, обеспечивающая необходи-

мую жесткость конструкции и надежную установку шкивов. Скорость хода пилы регулируется вариатором или частотным преобразователем, позволяющим плавно и бесступенчато изменять скорость резания. Станок оснащен ограничителями реза, приемным столом и системой гидромеханического натяжения полотна.

ООО "Перитон Индастриал" (г. Москва) предложило на Российский рынок оборудования для обработки труб, разработанное за рубежом.

Многопозиционный станок мод. НТ-10-22D (рис. 10) предназначен

для формовки концов труб. На станке можно установить до четырех формующих штампов и сервопривод позиционирования рабочих станций, работающих в автоматическом режиме. Привод стэнда обжатия гидравлический. Максимальные размеры обрабатываемых труб 19×1,4 мм. Скорость обработки на одной головке 3...4 с. Мощность двигателя станка 2,8 кВт. Станок рекомендован при производстве трубопроводов топливных и гидравлических систем автомобилей, грузоподъемной техники и других отраслей промыш-

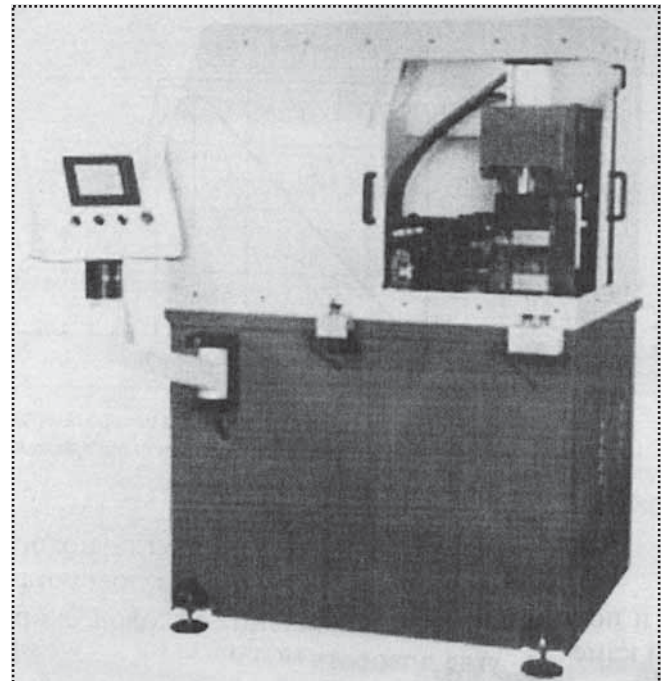


Рис. 10. Многопозиционный станок для формовки концов труб НТ-10-22D

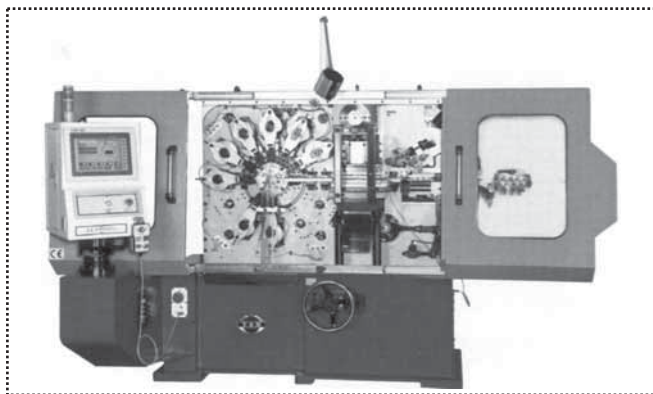


Рис. 11. Станок мод. YSM-36Т для формовки проволоки и металлической ленты

ленности, он обеспечивает высокую производительность и удобство в работе.

Станок мод. YSM-36Т (рис. 11) предназначен для формовки проволоки и металлической ленты при изготовлении плоских деталей из проволоки (крючки, кронштейны и тому подобные, в том числе с резьбой) и разнообразных изделий из полосы, таких как контактные элементы электроустановочных изделий, комуты, кронштейны и другие элементы крепежа, разнообразные пружины, зажимы и т.п. Диаметр обрабатываемой проволоки 0,6...3,2 мм, ширина ленты 30 мм, толщина 0,3...1,5 мм. Производительность станка – до 300 изделий/мин.

Универсальный гибочный станок мод. YSM CNC-BW 100 с ЧПУ (рис. 12) работает в автоматическом режиме в трехмерном пространстве и изготавливает сложные изделия из проволоки. Система ЧПУ станка оснащена цветным сенсорным экраном и клавиатурой. Дружественный графический интерфейс обеспечива-

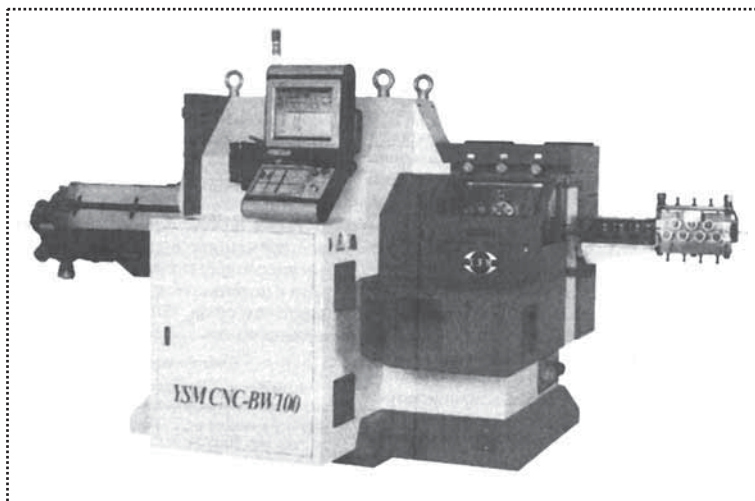


Рис. 12. Автоматический станок для гибки проволоки YSM CNC-BW100

ет легкое программирование геометрии изделия. Диаметр обрабатываемой проволоки 2,5...10,0 мм, максимальная скорость подачи 40 м/мин. Максимальные: угол гибки – 270°, угол оси вращения – 210°. Габаритные размеры станка 5100×2600×1930 мм.

Автоматическая отрезная линия мод. Pedrazzoli SB350AP предназначена для резки труб из любых материалов под углом от 60° влево и до 45° вправо. Линия также позволяет быстро нарезать заготовку на отрезки одинакового размера. Подающий механизм с шагом подачи до 600 мм оснащен приводом от пневмоцилиндра. Максимальный раствор тисков на падающем механизме 160 мм. Имеется программируемый счетчик деталей, устройство регулирования скорости подачи и реверс. Для влажной резки линия имеет систему охлаждения СОЖ со съемным насосом и устройство быстрой замены дискового полотна. Подвижная консоль поддерживает обрабатываемый материал. Стопоры смонтированы по обеим сторонам отрезной линии. Максимальный диаметр обрабатываемой трубы 115 мм. Частота вращения регулируемого пильного диска 15...90 мин⁻¹, диаметр полотна 350 мм. Масса линии без загрузчика 420 кг.

Компания "Оборудование интернейшенел" (г. Москва) предложила пневматические, электрические и гидравлические резьбонарезные манипуляторы.

Пневматический манипулятор мод. АТ-27П имеет пневматический резьбонарезной шпиндель, параллелограммную руку, устройство крепления на рабочем столе, модуль воздухоподготовки, шесть адаптеров под метчик с предохранительной муфтой, поворотную консоль для увеличения рабочей зоны на 500 мм. Резьбы, нарезаемые манипулятором, – М3...М27. Частота вращения шпинделя 70...220 мин⁻¹. Рабочая зона манипулятора 200...1900 мм, масса 31 кг.

Электрический резьбонарезной манипулятор мод. ЕТМ-32 имеет мощность 1,5 кВт и напряжение питающей сети 220 В. Манипулятор нарезает резьбы М3...М32. Частота вращения шпинделя до 300 мин⁻¹. В состав манипулятора входят:

- параллелограммная рука;
- мобильный рабочий стол;
- шесть адаптеров под метчик с предохранительной муфтой;
- поворотная консоль.

Рабочая зона манипулятора 200...1500 мм, масса 250 кг.

Гидравлический резьбонарезной манипулятор мод. НМ-60 (рис. 13) имеет:

- гидравлический резьбонарезной шпиндель;



Рис. 13. Гидравлический резбонарезной манипулятор мод. НМ-60

- параллелограммную руку;
- устройство крепления на рабочем столе;
- поворотную консоль;
- шесть адаптеров под метчик с предохранительной муфтой;
- рабочий стол на колесиках;
- гидромотор;
- гидравлическую помпу;
- электронный блок управления.

Резьбы, нарезаемые манипулятором, – М8...М60, частота вращения рабочего органа – до 360 мин^{-1} . Рабочая зона манипулятора 200...1600 мм, его масса 850 кг.

Кроме того были предложены дополнительные устройства к манипуляторам: магнитный кронштейн, устройство для нарезания резьбы в наклонных отверстиях и различные цанговые патроны для сверления.

Компания "Вебер Комеханикс" (г. Москва), представляющая в России более пятидесяти зарубежных производителей промышленного оборудования, продемонстрировала различную продукцию для предприятий машиностроения.

Пятикоординатный вертикальный обрабатывающий центр мод. DMX-320 предназначен для многокоординатной обработки сложных деталей с одной установки, в том числе одновременно по четырем из пяти или по пяти из пяти осей. Применение многокоординатной обработки позволяет снизить затраты времени на переустановку и существенно повысить точность взаимного расположения поверхностей детали. Станок предназначен для производства сложных деталей общего машиностроения. Размер рабочего стола (диаметр) 320 мм, перемещение по осям: $X - 600 \text{ мм}$,

$Y - 550 \text{ мм}$, $Z - 500 \text{ мм}$. Максимальный диаметр обрабатываемой заготовки 380 мм, мощность привода 11 кВт. Инструментальный магазин вмещает 24 инструмента. Масса станка 7 т, он оснащен системой ЧПУ мод. Janus-Ou-MD.

Аппарат с инверторным источником питания мод. Rainbow 180 – однофазный сварочный источник, отлично переносящий перепады напряжения в питающей сети (+15 и –20 %), имеющий высокий класс защиты IP23, что позволяет использовать его на открытых рабочих площадках. Возможно применение удлинителя от аппарата до сети питания длиной до 100 м без потери мощности. Аппарат применяют для сварки низкоуглеродистых, среднеуглеродистых, низколегированных, коррозионно-стойких сталей и чугуна в машиностроении, котельном производстве, нефтегазовой и атомной промышленности, при производстве пищевого оборудования, монтажных и сборочных работах. Он предназначен не только для сварки штучным электродом (ММА), но и для сварки неплавящимся электродом в среде аргона (TIG) при контактном возбуждении дуги. Плавное регулирование сварочного тока, система термостатической защиты от перегрузки, принудительная система охлаждения источника "туннельный эффект", функция "антистык" предотвращают залипание электрода. Функция "горячий старт" обеспечивает легкое возбуждение сварочной дуги, функция "форсирование дуги" обеспечивает стабильность ее горения. Питающее напряжение аппарата 230 В, максимальная потребляемая мощность 4,6 кВт. Его габаритные размеры $390 \times 135 \times 300 \text{ мм}$, масса 6 кг.

Машина стыковой контактной сварки оплавлением ленточных пил и ножей мод. BAS-210 применяют для производства сварных ленточных пил по дереву, биметаллических коррозионно-стойких ленточных пил по металлу, ленточных ножей по текстилю, коже, поролону и т.п., ленточных пил из коррозионно-стойкой стали по пищевым продуктам. Качество всех параметров сварки и отжига контролируется. Машина в своем составе имеет:

- гильотину;
- зачистное устройство;
- инфракрасный спектральный пирометр для бесконтактного измерения и отображения установленной вручную температуры;
- тиристорную систему отжига в автоматическом режиме;
- систему контроля за сварочным процессом;
- центрирующий упор для позиционирования свариваемых пил;
- пневматическое прижимное устройство.



Максимальная ширина полотна машины 210 мм. Ширина и толщина: ленточной пилы по металлу – 105×1,65 мм; ленточной пилы из коррозионно-стойкой стали – 80×0,6 мм; ленточного ножа – 120×1,3 мм. Максимальное поперечное сечение свариваемых изделий 360 мм². Система прижима обрабатываемого изделия – гидравлическая педаль. Номинальная мощность машины составляет 70 кВт, масса 620 кг.

Устройство пирометрического контроля и программного управления отжигом ленточных пил мод. "Пиро Мастер 300" представляет собой универсальный пирометр с микропроцессорными блоками измерения, индикации и управления электромеханическими цепями машин и аппаратов, используемых в технологическом процессе термообработки различных деталей. Одним из применений является отжиг ленточных пил после сварки. "Пиро Мастер 300" устанавливают на машины контактной сварки сопротивлением (BSS) и оплавлением (BAS) настольного исполнения. Устройство обеспечивает:

- выбор температуры от 300 до 1050 °С в каждом временном интервале режима и поддержание его со средней точностью ± 1 °С;
- задание многоступенчатого отжига;
- запоминание в памяти до 99 программ режимов отжига с простым вызовом любой из них;
- возможность корректировки параметров отжига введением поправочных коэффициентов с учетом коэффициентов черноты и развитости пилы;
- возможность программирования устройства (обновление операционной программы) через порт RS-232 и RS-485.

Пирометр состоит из двух функциональных блоков: модуля измерения и модуля управления. Модуль измерения имеет инфракрасный фотодиод на структуре индий–галлий–арсенид (In–Ga–As), который имеет максимум чувствительности на длине волны 1,5 мкм и обеспечивает диапазон видимости нагретых тел в диапазоне 280...1100 °С.

Фотодиод находится в температурно-стабильной камере, что обеспечивает независимость точности и чувствительности прибора от внешней температуры.

Измерительный модуль поддерживает автономную работу и измерение температуры при подключении его к компьютеру через порт RS-232.

Модуль управления принимает данные от модуля измерения и согласно установленной программе осуществляет управление технологическим процессом. Модуль управления обеспечивает установку сложной программы температурного режима с программируемыми временными интервалами нагрева, поддержа-

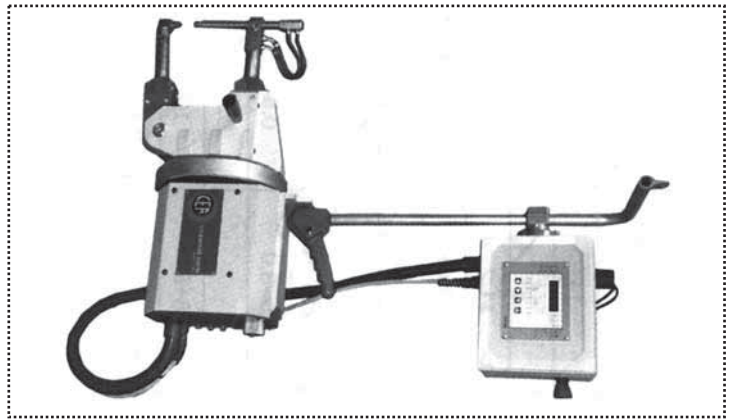


Рис. 14. Подвесные промышленные клещи мод. C-GUN28

ния и охлаждения в пределах 280...1100 °С и временными диапазонами от 2 до 999 с по каждому интервалу выполнения программы независимо.

Расстояние от измерительного модуля до точки измерения температуры 500 мм. Мощность, потребляемая устройством, – 150 Вт. Габаритные размеры: модуля измерения – 240×80×80 мм, модуля управления – 380×270×105 мм.

Подвесные промышленные клещи мод. C-GUN28 (рис. 14) предназначены для широкого диапазона задач промышленного производства. Их применяют при точечной сварке конструкций из стального листа и прутка в серийном и массовом производствах, сварки ответственных соединений с затрудненным доступом, монтажных, сборочных и ремонтных работах. Клещи имеют в своем составе:

- контроллер управления сварочным циклом, смонтированный в отдельном шкафу;
- карданный подвес с балансиром;
- встроенный водоохлаждаемый сварочный трансформатор;
- сменную оснастку для решения широкого круга задач.

Питающее напряжение клещей до 400 В; максимальный сварочный ток 16,8 кА. Масса клещей (с кабелем, шлангами, гироскопическим подвесом и хоботами с минимальным вылетом) – 58 кг. При помощи таких клещей можно сваривать листы из низкоуглеродистой стали толщиной 0,3...3,5 мм, коррозионно-стойкой стали толщиной 0,5...3,0 мм, алюминиевых сплавов толщиной 0,5...1,0 мм. Диаметр сварки прутка вкрест из низкоуглеродистой стали 14 мм.

Высокоточный пружинно-навигочный станок мод. HCA-160T (рис. 15) предназначен для изготовления пружин сжатия различных конфигураций с переменным или постоянным шагом, а также пружин различных форм – цилиндрической, конической, бочкооб-

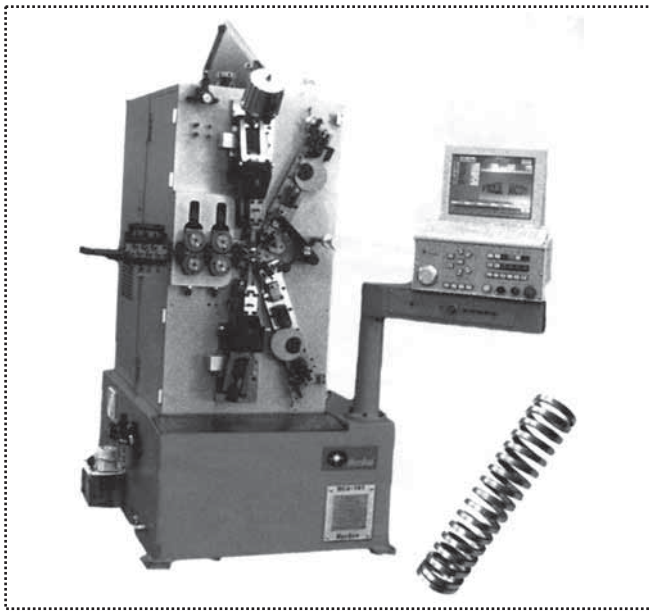


Рис. 15. Высокоточный пружинно-навивочный станок мод. HCA-160T

разной. Высокая производительность, быстрая переналадка и надежность станка обуславливаются отсутствием кулачкового механизма, т.е. каждый подвиж-

ной элемент имеет собственный программируемый привод, что значительно повышает надежность всей системы и позволяет перенастраивать станок на другие изделия в течение нескольких секунд. Станок оснащен системой ЧПУ (сервопривод: подачи, верхней и нижней гильотин, верхней и нижней навивочных направляющих, шага спирали), может производить резку проволоки различными методами: вертикальным ходом гильотины, орбитальным методом и торсионным методом. Прочная станина обеспечивает стабильность и надежность каждого узла станка. Диаметр обрабатываемой проволоки 8...16 мм при максимальной скорости подачи 30 м/мин. Максимальный внешний диаметр изготавливаемых пружин 250 мм. Габаритные размеры станка 4500×2280×2500 мм, его масса 16 т.

В рамках выставки были проведены семинары: "Инжиниринг в машиностроении", "Программное обеспечение в машиностроении" и конференция "Инновационное станкостроение. Комплексные технологии. Наука. Производство", круглый стол "Отечественное оборудование".

*Чл.-кор. Академии
проблем качества*

А.Н. Иванов

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".

Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru;
редакции журнала: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.

Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Солюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 13.12.12 г. Подписано в печать 24.01.13 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".

Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, г. Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.