



Ключевые слова:
интеллектуальные
технологические
системы, робот-
станок, механооб-
рабатывающее
оборудование

ПЕРСПЕКТИВНОЕ МЕХАНООБРАБАТЫВАЮЩЕЕ ОБОРУДОВАНИЕ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Вячеслав АФОНИН, Алексей СМОЛЕНЦЕВ

Приведены основные направления развития систем управления механообрабатывающего оборудования для обеспечения точности и высокого быстродействия. Описаны механизмы относительного манипулирования, роботы-станки для выполнения интеллектуальных технологических операций. Рассмотрены требования к системам управления для современного механообрабатывающего оборудования при выполнении интеллектуальных технологических операций.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания нового поколения станочного оборудования с элементами интеллектуального управления, в которых применены современные системы контроля, вычислительная техника и приводы, безусловно, требуется ускоренное внедрение новых разработок, в том числе российских ученых. В настоящее время имеются отечественные исполнительные приводы, датчики контроля и системы числового программного управления.

Системы управления станочного оборудования по своим функциональным возможностям должны обладать, в том числе, элементами интеллектуального управления.

Финишные операции обработки сложных поверхностей, в частности, финишная обработка пера лопаток авиационных двигателей, пера лопаток турбоагрегатов самого широкого назначения, выполняются, как правило, вручную. Поэтому для автоматизации подобных операций требуется оснащение станочного оборудования встроенными системами контроля, а программное обеспечение систем управления должно содержать элементы интеллектуального управления. При этом

возможно совместное взаимодействие человека-оператора и системы управления.

Особое требование предъявляется к механизмам, используемым в станочном оборудовании. Несмотря на консервативное отношение к кинематике и динамике станочного оборудования, в современном оборудовании используются новые механизмы относительного манипулирования.

В представленной работе рассматриваются результаты и выводы исследований, проведенных на робот-станке, выполняющем финишную операцию обработки пера лопаток авиационных двигателей. Рассмотрены требования к технологическому комплексу для выполнения интеллектуальных технологических операций.

МЕХАНИЗМЫ ОТНОСИТЕЛЬНОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ

Применительно к станочному оборудованию нашли широкое применение механизмы относительного манипулирования. На рис. 1 приведен зуборезный станок, в котором перемещение инструмента осуществляется манипулятором

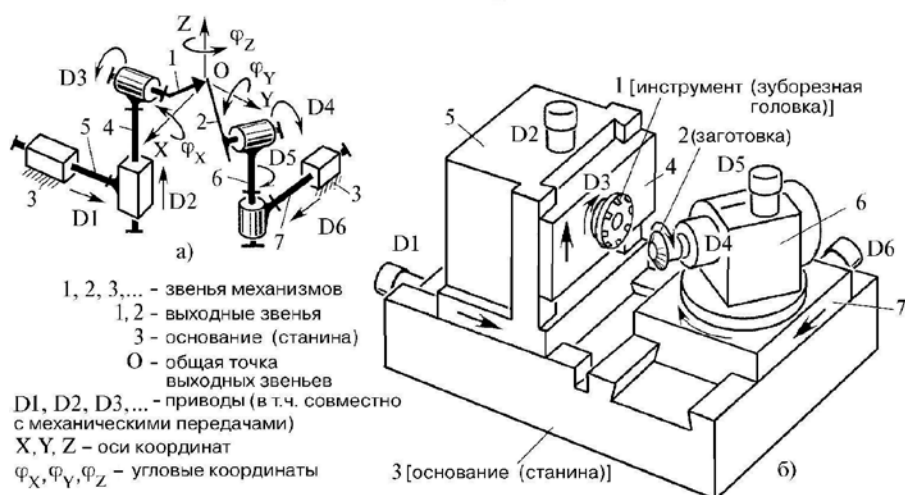


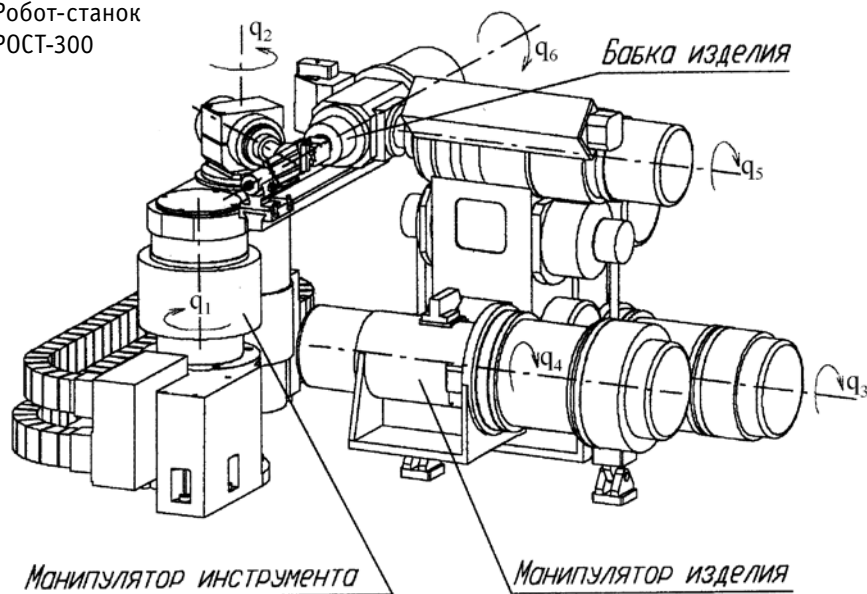
Рис. 1. Зуборезный станок с разделением функции воспроизведения относительного движения (заготовки и инструмента)

перемещения инструмента, а перемещение детали – манипулятором перемещения детали.

Данная схема имеет преимущество в сравнении с традиционными схемами, в которых все перемещения выполняются либо манипулятором детали, либо манипулятором инструмента. Обеспечивается большая жесткость за счет сокращения кинематических пар относительно основания станка, хотя, безусловно, суммарная погрешность на детали равна сумме погрешностей обоих манипуляторов.

Данные схемы имеют недостаток, который состоит в сложности настройки нулей датчиков положения. Это обусловлено тем, что система координат детали, относительно которой требуется

Рис. 2. Робот-станок РОСТ-300



перемещения между управляемыми координатами станка и координатами обрабатываемой детали определяется в явном виде.

Применение вращательных приводов для линейных перемещений дает следующие преимущества:

- вращательные сочленения проще в изготовлении (опоры вращения вместо линейных направляющих), при этом уменьшается влияние сил трения на выходное звено;
- имеется возможность выполнять транспортные и технологические операции одним и тем же механизмом, что позволяет выполнять автоматическую замену заготовки и правку режущего инструмента без применения дополнительных манипуляторов.

Вместе с тем у такой схемы имеются и определенные недостатки:

- усложняется геометрическая модель станка [2], и, как следствие, труднее провести процедуру калибровки, кроме того, рабочая зона становится неоднородной по силовым передаточным отношениям;
- управляемые координаты манипуляторов становятся динамически взаимосвязанными.

При формировании управляющих программ для робота-станка РОСТ-300 было установлено, что его рабо-

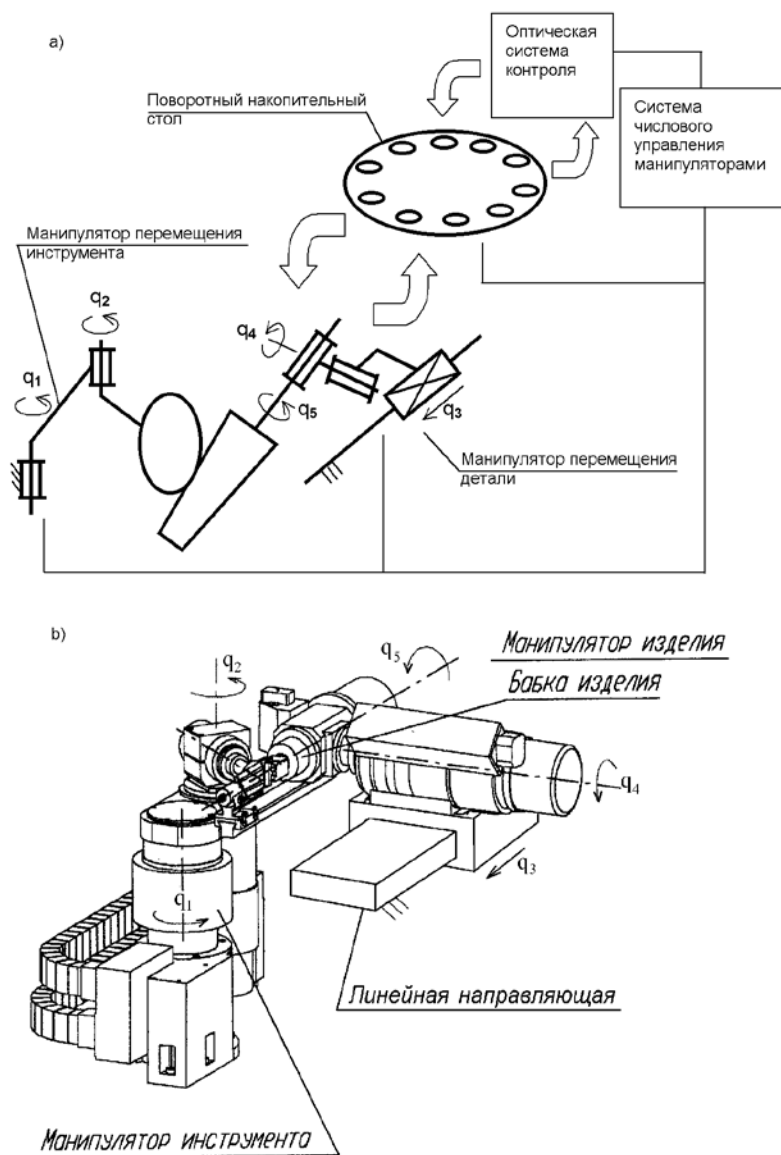


Рис. 3. Технологический комплекс финишной обработки пера лопаток

чая зона и требуемые углы сервиса не уменьшаются при замене механизма плоского пятизвенника на горизонтальный линейный привод (рис. 3) [3].

Это позволяет исключить необходимость статической разгрузки пятизвенника в манипуляторе изделия и уменьшить энергопотребление робота-станка, сохраняя преимущества его конструкции. Число степеней подвижности уменьшается с шести до пяти, достаточных для обработки вращающимся инструментом, в котором режущая кромка может перемещаться по режущей поверхности инструмента.

Для устранения недостатков, связанных с упругими деформациями стержневых конструкций,

необходима адаптивная система управления, оснащенная датчиками сил и вибраций.

Понятие робот-станок подразумевает выполнение транспортных и технологических операций одними и теми же манипуляторами. Для увеличения углов сервиса робота-станка, уменьшения инерционных констант и габаритов звеньев необходимы встраиваемые конструктивные элементы, в сборке образующие мехатронный модуль [4].

Используя вращательно-линейные мехатронные модули (рис. 4), возможно создать компактные конструкции станочного оборудования при обработке сложных поверхностей (рис. 5) [5].

В каждом вращательно-линейном мехатронном модуле (рис. 4) можно также применить шлицевой вал с шариковой втулкой вместо шлицевого соединения скольжения, а также применить цилиндрический линейный двигатель (ЦЛД) вместо сочетания шарико-винтовой передачи (ШВП) и вращательного. ЦЛД с 2010 года применяются в электроэрозионных станках фирмы Mitsubishi [6], поскольку экономическая эффективность их использования выше, чем у линейных синхронных электродвигателей традиционной конструкции.

Если необходимо обеспечить точность манипуляционной системы станка, требуется учет податливостей, трения, инерционных параметров, влияющих на его динамику. В некоторых случаях необходимо управление как положением инструмента, так и силой резания. Поэтому необходим адаптивный электропривод с переменными параметрами и структурой регулятора.

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРИВОДЫ

Широкое применение в технологическом оборудовании получили встраиваемые высокомоментные двигатели. Встраиваемые электродвигатели содержат только ротор и статор. При этом встраиваемые высокомоментные синхронные машины с ротором на основе постоянных магнитов имеют малые габариты из-за большего, в сравнении с другими электродвигателями, соотношения мощность/вес. Подобные двигатели

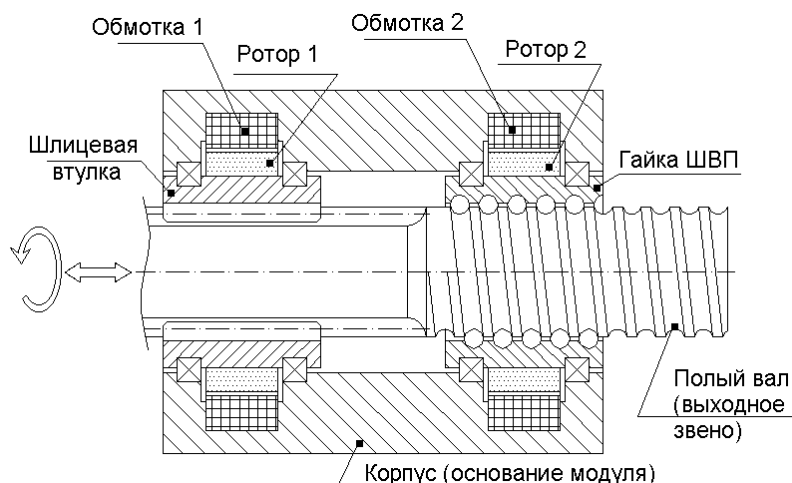


Рис. 4. Вращательно-линейный мехатронный модуль

ли фирмы Etel применены в работе-станке РОСТ-300, что позволяет выполнять приводные модули в сочленениях механизма станка при незначительном увеличении веса за счет силового привода.

Для высокоточного станочного оборудования целесообразно применение дополнительных приводов, встраиваемых в сочленения механизма. Это позволяет расширить возможности технологической машины. Однако следует осуществлять управление приводами выходного звена механизма таким образом, чтобы между ними отсутствовало «антагонистическое» взаимодействие. Необходимо, чтобы каждый привод выполнял только свои функции, не вступающие в противоречие с другими приводами. Один привод будет разгружать механизм от больших усилий, а второй привод более динамично и точно выполнять перемещения.

В теории автоматического управления широко известны многоконтурные системы управления. В данных системах грубый контур управления совершает перемещения объекта по траектории, а точный контур компенсирует ошибки грубого контура. Одновременная работа двух и более приводов, выполняющих управляемое перемещение по одной координате, из-за небольших отклонений по положению может приводить к возникновению предельных сил взаимодействия приводов друг на друга в статике и, особенно, в динамике.

Дополнительные приводы позволяют разгружать основные приводы от статических нагрузок и реакций связей в сочленениях, что, в свою очередь, повышает быстродействие при перемещении выходного звена по заданной траектории и,

как следствие, повышает точность воспроизведения программных движений.

Современные требования к точности и быстродействию при выполнении операций раскроя на лазерных станках, а также необходимость получения сложных поверхностей при нанесении покрытий, в свою очередь, требуют от приводов, выполняющих данные перемещения, больших развиваемых усилий, скоростей и ускорений. Данная задача может решаться применением одного привода, обладающего большой мощностью и развиваемым усилием, либо применением двух приводов, один из которых выполняет перемещение больших масс, но с меньшими скоростями и ускорениями, а второй привод перемещает небольшие массы (непосредственно инструмент).

Двухканальные системы нашли широкое применение в объектах наведения еще в далекие семидесятые годы. В монографии под редакцией Б.К. Чемоданова «Следящие приводы» [7] рассмотрены различные варианты двухканальных следящих приводов. В работе [8] были приведены различные типы специальных двух- и трехступенных

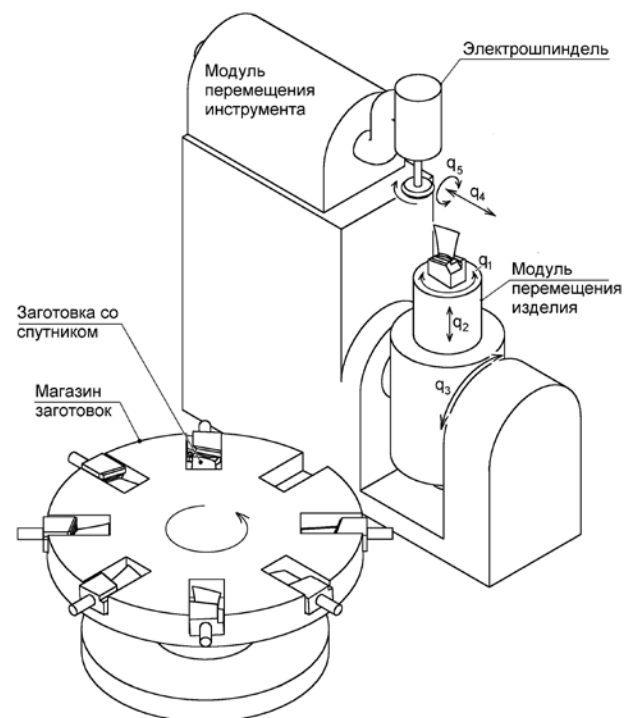


Рис. 5. Робот-станок на основе вращательно-линейных мехатронных модулей

головок, которыми оснащался сварочный промышленный робот. Головки оснащались системой слежения за свариваемым швом. Приводы робота осуществляли грубое перемещение вдоль шва, а головка перемещала сварочный инструмент с точностью, необходимой для расположения сварочной дуги относительно кромок шва.

В лазерном оборудовании фирмы Trumpf (Германия) применены дополнительные степени подвижности перемещения лазерной головки для раскроя. При этом, в качестве механизмов перемещения инструмента применен облегченный механизм параллельной структуры, обеспечивающий перемещение по двум координатам. Белорусская фирма «Рухсервомотор» также выпустила станок для раскроя листового материала, в котором применена двухканальная система для управления по одной координате.

Возможно также применение сочетания двухступенного плоского механизма параллельной структуры и традиционного порталного манипулятора с целью улучшения динамических свойств манипуляционной системы, например Salvagnini L5 (Италия), для лазерной резки [9]. В нем манипулятор параллельной структуры имеет небольшой диапазон перемещений по оси X , перемещая небольшую массу, что позволяет перемещать рабочий инструмент с большими ускорениями и скоростью при высокой точности. Требуемый диапазон перемещений по оси X (рис. 6) обеспечивается порталным манипулятором традиционной конструкции.

В работе [10] рассмотрены различные структурные схемы для двухканальной системы управления порталным механизмом перемещения для лазерного станка (рис. 6) и предложена система

управления, позволяющая исключить скоростные ошибки.

Перемещение по осям X и Z может осуществляться с большими скоростями и ускорениями одним приводом, так как масса каретки m_k включает массу собственно инструмента. Для выполнения движения инструмента по оси Y требуется, кроме каретки m_k перемещать портал m_n . Поэтому для глобальных перемещений по оси Y применены мощные приводы D_y , а для локальных перемещений в направлении данной оси используется дополнительный привод D_{y2} перемещения каретки m_k .

Использование дополнительного привода позволяет повысить точность выполнения технологических операций и выполнять перемещение инструмента с высокими скоростями и ускорениями.

ЭЛЕМЕНТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Впервые понятие **искусственный интеллект** было введено британским математиком Аланом Тьюрингом в работе «Вычислительная машина и интеллект» (журнал Mind, 1950 г.). Алан Тьюринг предложил понимать под интеллектуальным поведением программы, моделирующее разумное поведение человека. Термин искусственный интеллект (Artificial Intelligence) вошел в техническую терминологию в 1956 году на семинаре в Дартмутском колледже (США).

Предметом искусственного интеллекта является изучение интеллектуальной деятельности человека. Под **интеллектуальной системой** будем в дальнейшем понимать адаптивную систему, позволяющую строить программы целесообразной деятельности по решению поставленных перед ними задач на основании конкретной ситуации, складывающейся на данный момент в окружающей их среде.

В данной работе, не вдаваясь в полемику определений, попытаемся изложить существо проблемы создания интеллектуальных технологических систем, автоматизирующих производственные технологические операции, выполняемые, как правило, непосредственно рабочим.

Под **интеллектуальной технологической систе-**

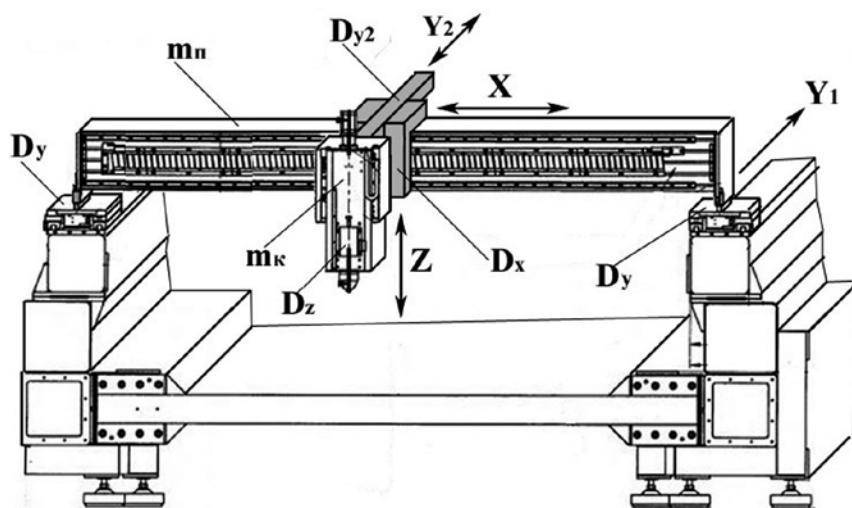


Рис. 6. Станок для раскроя листового материала

мой будем понимать интеллектуальную систему, основанную на правилах и предназначенную для выполнения недетерминированной производственной операции, в которой на основе информации систем контроля технологических параметров необходимо сформировать цель и назначить программу выполнения технологической операции персонально для данного изделия.

Структура интеллектуального технологического комплекса для финишной обработки сложных поверхностей пера лопаток ГТД представлена на рис. 3. Технологический комплекс финишной обработки пера лопаток включает робот-станок, выполняющий операцию механической обработки пера, накопительный стол, который выполняет функцию загрузки и транспортировки заготовок к месту обработки и выгрузки обработанных деталей, а также встроенную оптическую систему контроля.

В технологический комплекс, кроме представленных на рисунке элементов, входят устройства установки на стол заготовок со спутниками и снятия готовых деталей, устройства загрузки заготовок в робот-станок, подачи их на систему контроля и цифровая вычислительная система, выполняющая функции интеллектуального управления. В качестве вычислительной системы обычно используется удаленный от технологического комплекса сервер.

Интеллектуальные технологические системы содержат переменную (настраиваемую) модель технологического процесса для каждой детали, непосредственную информацию об обрабатываемых деталях и информацию об исполнительном инструменте. Цель и управляющие воздействия формируются в интеллектуальной технологической системе на основе знаний о технологическом процессе, обрабатываемом изделии, инструменте на основе моделирования ситуаций на виртуальной исполнительном системе.

Интеллектуальную технологическую систему также следует представлять состоящей из двух

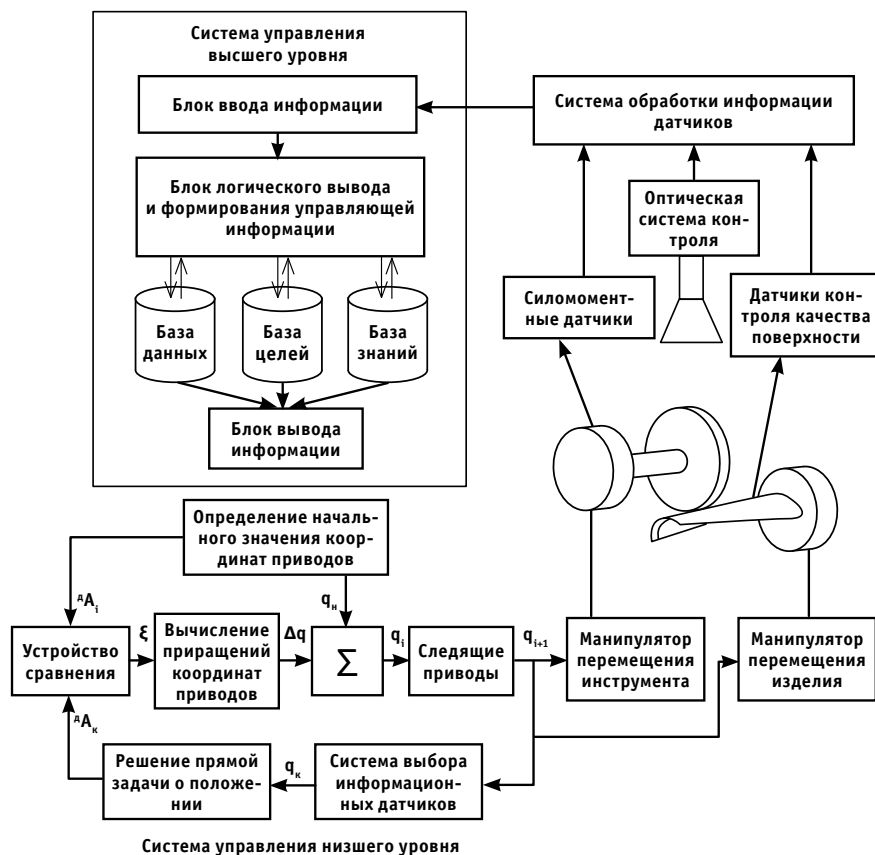


Рис. 7. Интеллектуальная технологическая система

подсистем (рис. 7). Подсистема управления высшего уровня выполняет функции хранения информации об обрабатываемом изделии, технологическом процессе, задачах, выполняемых обрабатывающим оборудованием. Основная задача, стоящая перед данной подсистемой – это моделирование процесса обработки, выбор перемещений и управляющих действий, которые должна выполнить реальная исполнительная система в реальном времени. Система высшего уровня выполняет функции в виртуальном пространстве. На начальном этапе обучения, безусловно, функции системы высшего уровня выполняются опытными специалистами. И только в процессе накопления знаний данные функции передаются автоматической системе.

Входом системы высшего уровня (рис. 7) является блок ввода информации, предназначенный для ввода данных о результатах выполняемой технологической операции и объекта управления. На вход системы поступает как информация с датчиков, определяющих состояние объекта управления, так и информация о технологическом процессе. В качестве датчиков используются силомоментные датчики, датчики акустической эмиссии, дистанционные



Рис. 8. Структурная схема интеллектуальной технологической системы управления робота-станка

встраиваемые оптические системы. Входная информация поступает в блок логического вывода, либо сразу в базу данных. База данных представляет совокупность таблиц, хранящих, как правило, символьную и числовую информацию о технологическом процессе, обрабатываемых изделиях и инструменте.

Блок логического вывода и формирования управляющей информации обеспечивает нахождение решений для нечетко формализованных задач, осуществляет планирование действий и формирование управляющей информации для пользовате-

ля и управления системой низшего уровня на основе базы знаний, данных и целей.

База знаний – это совокупность правил и действий, которые необходимо выполнить с данной деталью и заданным технологическим процессом.

База целей – это множество локальных целей, представляющих собой совокупность знаний, активизированных в конкретный момент и в конкретной ситуации для достижения глобальной цели. Это отдельные запрограммированные перемещения инструмента, выполняемые в зависимости от информации, получаемой, например, от оптической системы контроля.

На выходе системы высшего уровня блок вывода информации обеспечивает выдачу информации в реальном времени для управления системой низшего уровня. Контур обратной связи с системы низшего уровня позволяет реализовать адаптивное управление и обучение интеллектуальной системы.

На этапе проектирования интеллектуальной системы и наполнения ее знаниями о процессе и обрабатываемых деталях эксперты и инженеры наполняют базу знаний и базу целей, а программисты разрабатывают программы алгоритмических методов решений. База данных создается и пополняется, как правило, в процессе эксплуатации интеллектуальной системы.

Искусственный интеллект технологической системы, рассмотренной выше, заключается в возможности распознавать детали и их поверхности с точки зрения качества и соответствия заданным геометрическим размерам по чертежу, управлять технологическим процессом и принимать решения по его изменению. В свою очередь, принятие решения включает формирование промежуточных целей для выполнения поставленной задачи.

На рис. 8 приведена общая блок-схема интеллектуальной технологической системы управления, представляющая экспертную систему, основанную на правилах. Работа экспертной системы рассмотрена на примере интеллектуальной технологической системы управления робота-станка для обработки сложных поверхностей.

Система управления предназначена для финишной обработки пера лопаток авиационных двигателей, а также других турбоустановок. Для каждой лопатки, поступающей на финишную обработку, необходимо корректировать программу обработки пера. Поэтому система должна обладать определенной интеллектуальностью, связанной, в частности, с возможностью принятия решений по необходимой корректировке программ обработки на основе информации, поступающей от системы контроля.

Корректировка программ связана с деформациями пера лопатки, возникающими в процессе предварительной обработки, невозможно изготовить лопатку с одинаковыми минимально возможными допусками на все участки пера лопатки и выполнять финишную операцию обработки пера по одной программе. Так допуск на закрутку пера (в линейном выражении) назначается достаточно большим (для некоторых лопаток он находится в пределах одного миллиметра и даже более), в то время как допуск на геометрические размеры кромки составляет сотые доли миллиметра.

Данная проблема может решаться при условии назначения припуска на финишную операцию, который бы перекрывал максимальный допуск. Но это потребует снимать при шлифовании большой слой материала.

Поэтому наиболее экономично осуществлять контроль каждой заготовки, приходящей на операцию финишной обработки, выполнять операцию вписания готовой детали в поступившую заготовку и назначать траекторию обработки индивидуально для данной заготовки. Данная процедура должна выполняться для каждой детали, поступающей на финишную операцию.

Основная проблема создания подобных систем состоит в обеспечении их работы в реальном времени. Необходимо за время выполнения операции обработки одной детали выполнить измерение следующей заготовки, промоделировать процесс обработки и назначить программу для ее обработки. Быстродействие современной вычислительной техники позволяет выполнить данные операции, в частности, для финишных операций обработки пера лопаток ГТД.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания перспективных станков необходимо использовать встраиваемые электродвигатели, это сокращает перемещаемые массы и упрощает конструкцию. Встраиваемые системы контроля геометрических параметров изготавливаемой детали и качества обработки позволяет в процессе обработки изменять режимы резания для получения требуемых геометрических размеров и качества детали. Применение двухканальных систем управления дает возможность существенно повысить быстродействие и точность выполняемой операции.

Интеллектуальные технологические операции, выполняемые в настоящее время только вручную, для их автоматизации требуют создания систем управления, содержащих встраиваемые системы

контроля, вычислительные и программные средства, позволяющие решать отдельные интеллектуальные задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аксенов В.И., Афонин В.Л., Веденеев В.Н., Власенков А.В., Крайнев А.Ф.** Патент RU2202465. Устройство для механической обработки изделий сложной пространственной формы. 20.04.2003.
2. **Bringmann В.** Improving Geometric Calibration Methods for Multi-Axis Machining Centers by Examining Error Interdependencies Effects. — ETH ZURICH, 2007. 132 с.
3. **Афонин В.Л., Смоленцев А.Н., Панфилов А.Н.** Анализ кинематических характеристик робота-станка при введении дополнительных неуправляемых координат // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014. № 4. С. 63–69.
4. **Егоров О.Д., Подураев Ю.В.** Мехатронные модули. Расчет и конструирование / Уч. пос. — М.: МГТУ «СТАНКИН», 2004. 362 с.
5. **Смоленцев А.Н.** Патент № RU2353502 Устройство для механической обработки изделий сложной пространственной формы. 2009. Бюл. № 12.
6. **Захаров С., Зенкевич Ю.** ЦЛД. Система управления приводами электроэрозионных станков Mitsubishi Electric // ИТО. 2015. № 6. С. 20–22.
7. **Следящие приводы** / Под ред. Б.К. Чемоданова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 903 с.
8. **Афонин В.Л.** Двухканальная система сварочного робота. Труды Международного коллоквиума «Промышленные роботы». ВНР, г. Сегед, 1979. 7 с.
9. **Баттэ Клод.** Патент RU2546269. Низкоинерционный манипулятор для станков для лазерной резки плоского листового материала. 10.04.2015 г.
10. **Афонин В.Л., Лобач А.Ю., Миленький М.Н., Рокачевский Д.О.** Двухканальная манипуляционная система // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. № 3. С. 41–48.

АФОНИН Вячеслав Леонидович –

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории Управления технологическими процессами и системами Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

СМОЛЕНЦЕВ Алексей Николаевич –

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории Управления технологическими процессами и системами Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН