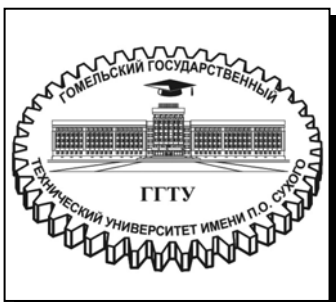




Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Технология машиностроения»

Д. Л. Стасенко, Е. В. Хазеев

ОСНОВЫ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
для студентов специальностей 1-36 01 01
«Технология машиностроения» и 1-53 01 01
«Автоматизация технологических процессов
и производств (по направлениям)»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2025

УДК 62-83-521+621.865.8(075.8)
ББК 34.5-055я73
С77

*Рекомендовано научно-методическим советом
машиностроительного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 5 от 20.06.2023 г.)*

Рецензент: и.о. директора ОАО «ГСКТБ ГА» А. А. Гинзбург

Стасенко, Д. Л.
С77 Основы мехатроники и робототехники : учеб.-метод. пособие для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения» и 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (по направлениям)» днев. и заоч. форм обучения / Д. Л. Стасенко, Е. В. Хазеев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2025. – 94 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 2 Gb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; ALT Linux 10.1 ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <https://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана

Составлен в виде теоретической части, необходимой для изучения дисциплины, разбитой по основным темам. Содержит теоретические сведения для изучения основ мехатроники и робототехники, приведены общие сведения и терминология, применяемые в мехатронике и робототехнике. Представлены основные направления развития, технологическое обеспечение, требования, предъявляемые к мехатронным и робототехническим модулям и системам. Даны примеры мехатронных и интеллектуальных робототехнических систем, указаны используемые информационно-измерительные устройства (датчики), применяемые в мехатронных модулях и робототехнических системах, а также концепция проектирования мехатронных модулей и роботов на их основе.

Для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения» и 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств (по направлениям)» дневной и заочной форм обучения.

УДК 62-83-521+621.865.8(075.8)
ББК 34.5-055я73

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2025

ТЕМА 1 ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О МЕХАТРОНИКЕ И РОБОТОТЕХНИКЕ

1.1 Назначение и область применения мехатроники. Возникнув в результате второй электронной революции, мехатроника явилась ответом на запросы практики. Резкий подъем производства микропроцессоров и больших интегральных схем существенно расширило возможности электронных устройств управления, что позволило при малых габаритах и высокой надежности придать им такие новые свойства, как функциональная гибкость и адаптация в соответствии с требованиями к управляемому механическому процессу.

За время своего непродолжительного существования мехатроника проникла во все сферы человеческой деятельности, оформилась в приоритетное направление развития науки и техники, вошла в перечень «критических технологий», определяющих уровень производства, конкурентоспособность продукции, качество жизни, обороноспособность и безопасность государства. При этом наибольшее применение мехатронные системы находят в таких отраслях машино- и приборостроения, как станко- и автомобилестроение, робототехника и вычислительная техника, а также железнодорожная, авиакосмическая, медицинская, офисная, военная и бытовая техника [1].

В последние годы была предложена физическая трактовка мехатроники как «средство принятия решения по управлению функционированием физических систем» или как «компьютерное управление передачей физической энергии в управляемых технических системах». Эти понятия предполагают тесную связь мехатроники с информатикой и компьютерной техникой для обработки информации и управления, причем информатика составляет ее теоретическую, а компьютерная техника – техническую составляющую.

Исходя из указанной физической трактовки мехатронных систем можно сформулировать цель, предмет и метод мехатроники.

Цель мехатроники состоит в создании интеллектуальных машин и физико-технических систем и процессов различного назначения, обладающих качественно новыми функциями и свойствами.

Предметом мехатроники являются методы и процессы проектирования и производства качественно новых модулей и машин, а на их основе – интеллектуальных исследовательских и промышленных самоорганизующихся и самоуправляемых технических систем.

Метод мехатроники основан на системном сочетании (синергетическом объединении) таких ранее обособленных естественнонаучных и инженерных направлений, как точная механика, микроэлектроника, электротехника, компьютерное управление и информатика на всех этапах жизненного цикла изделий, начиная с маркетинга и проектирования и продолжая на этапах реализации (производства), эксплуатации и утилизации. Основой метода мехатроники является синергетическая интеграция (объединение) структурных элементов, технологий, энергетических и информационных потоков для достижения единой цели.

Синергетическая интеграция элементов при проектировании мехатронных изделий основана на трех базовых принципах:

- реализация создаваемых изделий минимально возможным числом структурных и конструктивных блоков за счет объединения двух и более элементов в единые многофункциональные модули (блоки);
- выбор интерфейсов (связей между блоками) в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как сепаративных элементов;
- перераспределение функций в мехатронной системе от аппаратных блоков к интеллектуальным (компьютерным, информационным, программным) компонентам.

Степень интеграции мехатронной системы является одним из основных классификационных признаков в мехатронике. Среди других классификационных признаков развития мехатронных систем выделяются интеллектуализация и миниатюризация.

Мехатронные технологии базируются на комплексном применении маркетинговых, проектно-конструкторских, производственных, технологических, компьютерных и информационных методов и технологий, которые обеспечивают полный жизненный цикл мехатронных изделий.

Метод мехатроники и мехатронные технологии носят универсальный характер и применимы как к прикладным инженерным разработкам, так и к разработке теоретической базы построения сложных физико-технических систем (техническое зрение, управление «с голоса», распознавание сцен, виртуальная инженерия и быстрое прототипирование, автоматические самоорганизующиеся и самоуправляемые системы и др.).

Стремительное развитие мехатроники в мире – закономерный процесс, который вызван принципиально новыми требованиями рын-

ка к показателям качества технологических машин и сложным физико-техническим системам и процессам.

В машиностроении целью и предметом мехатроники является создание и производство качественно новых модулей движения и машин на их основе, для реализации заданных функциональных движений машин и механизмов. Функциональное движение мехатронной системы предусматривает ее целенаправленное механическое движение (перемещение), которое координируется с параллельно управляемыми технологическими и информационными процессами.

Большие возможности открылись перед мехатроникой в результате ее сближения с микросистемными технологиями (микроэлектромеханические технологии, микроробототехника и др.). Сформировалось самостоятельное направление в мехатронике – микромехатроника. В последние годы наметилось проникновение мехатронных технологий в нанотехнологии. В основном это выражается в создании прецизионных устройств и приборов для исследования и создания наноструктур с уникальными свойствами (сканирующий туннельный микроскоп, атомно-силовой микроскоп, оптический лазерный силовой микроскоп, наноинженерия поверхности деталей и др.).

Сегодня мехатроника находит широкое применение в следующих областях:

- машиностроение (автоматизированное машиностроение, станкостроение, электронное и энергетическое машиностроение и др.);
- транспортное машиностроение (авиакосмическая техника, тракторное машиностроение, железнодорожный транспорт, нетрадиционные транспортные средства и др.);
- робототехника различного назначения;
- приборостроение (контрольно-измерительные устройства и машины, офисная техника, навигационные приборы, вычислительная техника);
- микроэлектромеханические системы (микромашин, микророботы и др.);
- нанотехнологии (микроскопы, зонды, машины микромеханической обработки поверхностей деталей и др.);
- бытовая техника (автономные пылесосы, швейные, стиральные, посудомоечные машины, холодильные установки);
- медицинское и спортивное оборудование (биоэлектрические и экзоскелетные протезы для инвалидов, тренажеры, массажеры и вибраторы и др.);

- фото- и видеотехника (устройства фокусировки видеокамер, проигрыватели видеодисков и др.);
- полиграфические машины;
- интеллектуальные аттракционы для шоу-индустрии.

Этот список может быть расширен. Рынок мехатронной техники динамически развивается и имеет устойчивую тенденцию к росту.

1.2 Назначение и область применения робототехники.

Робототехника, пройдя путь от манипуляторов (1940–1950 гг.), на рубеже XXI в. подошла к следующему этапу своего развития – созданию интеллектуальных макро- и микророботов. Однако одним из основных направлений развития робототехники все же является комплексная автоматизация производства, создание гибких автоматизированных производств, прежде всего, в машиностроении.

До 80-х гг. XX в. развитие робототехники происходило независимо от мехатроники. В дальнейшем мехатроника развивалась в основном на базе робототехники и в настоящее время мехатроника и робототехника объединены в одно направление инженерного образования.

Мехатроника и робототехника различаются по классификационным признакам: мехатроника изучает новый методологический подход к созданию модулей и машин с качественно новыми характеристиками, роботы же представляют собой один из современных классов машин с компьютерным управлением.

Мехатронный подход охватывает все основные фазы жизненного цикла роботов (проектирование, производство, эксплуатация, утилизация) и принципы построения робототехнических систем. Один из таких принципов – модульное построение робототехники. Мехатроника стала базой для создания нового поколения модулей – конструктивно унифицированных функциональных компонентов робототехнических систем. Для робототехники наиболее актуально создание следующих типов мехатронных модулей:

- модули технического зрения, обеспечивающие распознавание в реальном времени сложных объектов и сцен;
- силовметрические модули для манипуляторов (системы силового очувствления);
- приводные модули типа «искусственные мышцы», не уступающие по массогабаритным параметрам мышцам живых организмов (электроактивные полимеры, материалы с эффектом памяти и т. п.);

– микросистемные модули энергопитания, имеющие массогабаритные параметры несравненно лучше современных бортовых аккумуляторов, топливных и других источников электроэнергии, применяемых в робототехнике.

Создание такой самодостаточной системы модулей – основа для формирования нового поколения средств робототехники в течение 3–5 лет. Без использования интеграционного мехатронного подхода и без применения систем интеллектуального управления достигнуть современного уровня функционирования роботов практически невозможно.

В заключение перечислим основные перспективные области применения робототехники [3]:

1. Робототехника наземного и воздушного базирования. Сюда относятся создание автоводителей и автопилотов, робототехнические системы для действий в экстремальных условиях, в том числе для вооруженных сил и других силовых структур, групповое применение роботов и создание следующих интеллектуальных поколений таких роботов, ориентированных на автономное функционирование. Большие перспективы связаны с микроробототехникой. Летающие, плавающие, ползающие и тому подобные микророботы произведут качественные изменения во многих важнейших сферах человеческой деятельности.

2. Био- и медицинская робототехника. С ней связана как проблематика заимствования бионических решений, так и обратный процесс внедрения робототехники в живые организмы. Начало последнему положило протезирование конечностей, затем усиление физических возможностей человека для функционирования в экстремальных условиях (активные скафандры, биоуправляемые шагающие машины и т. п.). Наконец, появились новые поколения интеллектуальных протезов и экзоскелетов, роботы-сиделки, робототехнические системы для реабилитации инвалидов, массажисты и т. п. Однако прежде всего – это новые области применения робототехники, такие, как хирургия, в том числе дистанционная, микророботы для внутрисосудистой и внутриполостной диагностики и хирургии.

3. Космическая робототехника. Сегодня это важнейшая часть очередного этапа развития исследований и освоения космоса. Космическая робототехника открывает перспективы создания принципиально новых космических аппаратов и их систем, в том числе и в око-

лоземном пространстве, включая наноспутники, монтажно-сборочные и регламентные работы на орбите и т. п.

4. Подводная робототехника. Наряду с космосом это второе направление «экспансии» человечества, в котором решающую роль должна играть робототехника. Если человек-амфибия – фантастика, то роботы-амфибии – уже реальность. Достаточно напомнить их работу по обследованию затонувших кораблей, использование подводных роботов-геологов. А ведь это, по существу, еще только предыстория подводной робототехники.

В настоящее время еще нет ни лунных, ни других космических баз, обслуживаемых роботами, нет и подобных подводных сооружений. Однако если сегодня основное направление развития современного машиностроительного производства – создание безлюдных комплексно-роботизированных предприятий, то тем более это должно относиться к освоению космоса и глубин океана.

Среди перечисленных перспективных областей применения робототехники не названа промышленная робототехника. Объясняется это тем, что, хотя в обозримом будущем основной мировой парк роботов по-прежнему будут составлять промышленные роботы, но этот уже сложившийся раздел робототехники будет определять ее развитие в рассмотренных ранее направлениях.

ТЕМА 2 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ.

Основными квалификационными признаками, определяющими направление развития мехатронных и робототехнических систем, являются *интеграция, интеллектуализация и миниатюризация*.

Мехатроника и робототехника используют системный подход к исследованию, созданию и производству сложных технических систем. В широком смысле системный подход – способ принятия решений в условиях, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы. В узком смысле принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей сложной системы с учетом их взаимодействия. Системный подход включает в себя выявление функций и структуры системы, типизацию (группировку по характерным признакам) связей, определение свойств (атрибутов) системы, анализ влияния внешней среды, выбор системы управления.

Мехатроника и робототехника демонстрируют новый методологический подход к построению машин и систем с качественно новыми характеристиками. Например, разработка мехатронных систем и машин методом параллельного проектирования (одновременный и взаимосвязанный синтез всех компонентов системы), а сами интегрированные мехатронные компоненты выбираются еще на начальной стадии проектирования при разработке технических заданий и решений.

2.1 Модули мехатронных систем и их классификация.

Базовыми объектами изучения мехатроники и робототехники являются мехатронные модули различного назначения. Проектирование современных мехатронных систем основано на модульных принципах и технологиях.

Модуль – это унифицированная функциональная часть машины (системы), конструктивно оформленная как самостоятельное изделие или подсистема.

Мехатронный модуль – это функционально и конструктивно самостоятельное синергетически, аппаратно и программно интегрированное изделие (или подсистема), состоящее из элементов различной физической природы и предназначенное для реализации определенных функций системы. Модули могут состоять из отдельных мехатронных элементов (компонентов).

Мехатронные модули мехатронных систем по характеру выполняемых ими функций и по составу входящих в них устройств и элементов можно подразделить на три группы:

- 1 Исполнительные мехатронные модули движения.
- 2 Измерительно-информационные мехатронные модули.
- 3 Мехатронные модули систем управления различного уровня.

Исполнительные мехатронные модули движения по составу объединяемых устройств и элементов можно разделить (рисунок 2.1):

- a) на модули движения (МД);
- b) мехатронные модули движения (ММД);
- c) интеллектуальные мехатронные модули движения (ИММД).

Модуль движения (МД) – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя механическую (гидравлическую, пневматическую) и электротехническую части, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

Примерами МД являются мотор-редукторы, мотор-колесо, мотор-барабан, электрошпиндель. Мехатронный модуль движения (ММД) – конструктивно и функционально самостоятельное изделие, включающее в себя механическую (гидравлическую, пневматическую), электротехническую, электронную и информационную части, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями.

В отличие от МД в ММД появились электронные и информационные устройства. В последнее время наметилась реальная интеллектуализация исполнительных мехатронных модулей движения на приводном уровне машин и механизмов.

Интеллектуальный мехатронный модуль движения (ИММД) – конструктивно и функционально самостоятельное изделие с синергетической интеграцией механической (гидравлической, пневматической), электрической, электротехнической, электронной и компьютерной (микропроцессорной) частей, которое можно использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями (рисунок 2.2).

Таким образом, по сравнению с ММД в конструкцию ИММД дополнительно включены микропроцессорные вычислительные устройства и силовые электронные преобразователи, а также элементы, обеспечивающие интеллектуальное управление со степенью интеллектуальности хотя бы в малом.



Рисунок 2.1 – Классификация модулей движения

Информационно-измерительные мехатронные модули предназначены для сбора, обработки, передачи, хранения и представления достоверной информации в удобном для вычислительной техники виде для реализации управления мехатронными системами.

Мехатронные модули систем управления различного уровня предназначены для управления сложными динамическими объектами и предполагают многоуровневую иерархическую структуру, включающую стратегический, тактический и исполнительный уровни управления, имеющие доступ к информационно-измерительному мехатронному модулю для решения задач управления на каждом иерархическом уровне управления мехатронной системы.

В общем случае сложность задач управления мехатронными системами обуславливает целесообразность и необходимость их решения с привлечением методов и технологий искусственного интеллекта.

2.2 Обобщенная структура мехатронных машин.

Интеллектуальная мехатронная машина (ИММ) – это интеллектуальная многомерная система, построенная на мехатронных принципах и технологиях, которая способна эффективно выполнять программы функциональных движений в условиях нечеткой и неполной информации о целях, эксплуатационных характеристиках машины и параметрах внешней среды. Частным случаем такой машины является интеллектуальная робототехническая система. Обобщенная структура мехатронной машины, в основу построения которой положена структура автоматических роботов, показана на рис. 2. Внешней средой для машин рассматриваемого класса является технологическая среда, которая содержит различное основное и вспомогательное оборудование, технологическую оснастку и объекты работ.

Внешние среды укрупнено можно разделить на два основных класса: детерминированные и недетерминированные.

К детерминированным относятся среды, для которых параметры возмущающих воздействий и характеристики объектов работ могут быть заранее определены с необходимой точностью.

Некоторые среды являются недетерминированными по своей природе, например, экстремальные подводные и подземные среды.

Характеристики технологических сред, как правило, могут быть определены с помощью аналитико-экспериментальных исследований и методов компьютерного моделирования. При выполнении меха-

тронной системой заданного функционального движения объекты работ оказывают возмущающие воздействия на рабочий орган. Примерами таких воздействий могут служить силы резания для операций механической обработки, контактные силы при сборке, реакция струи жидкости для гидравлической резки.

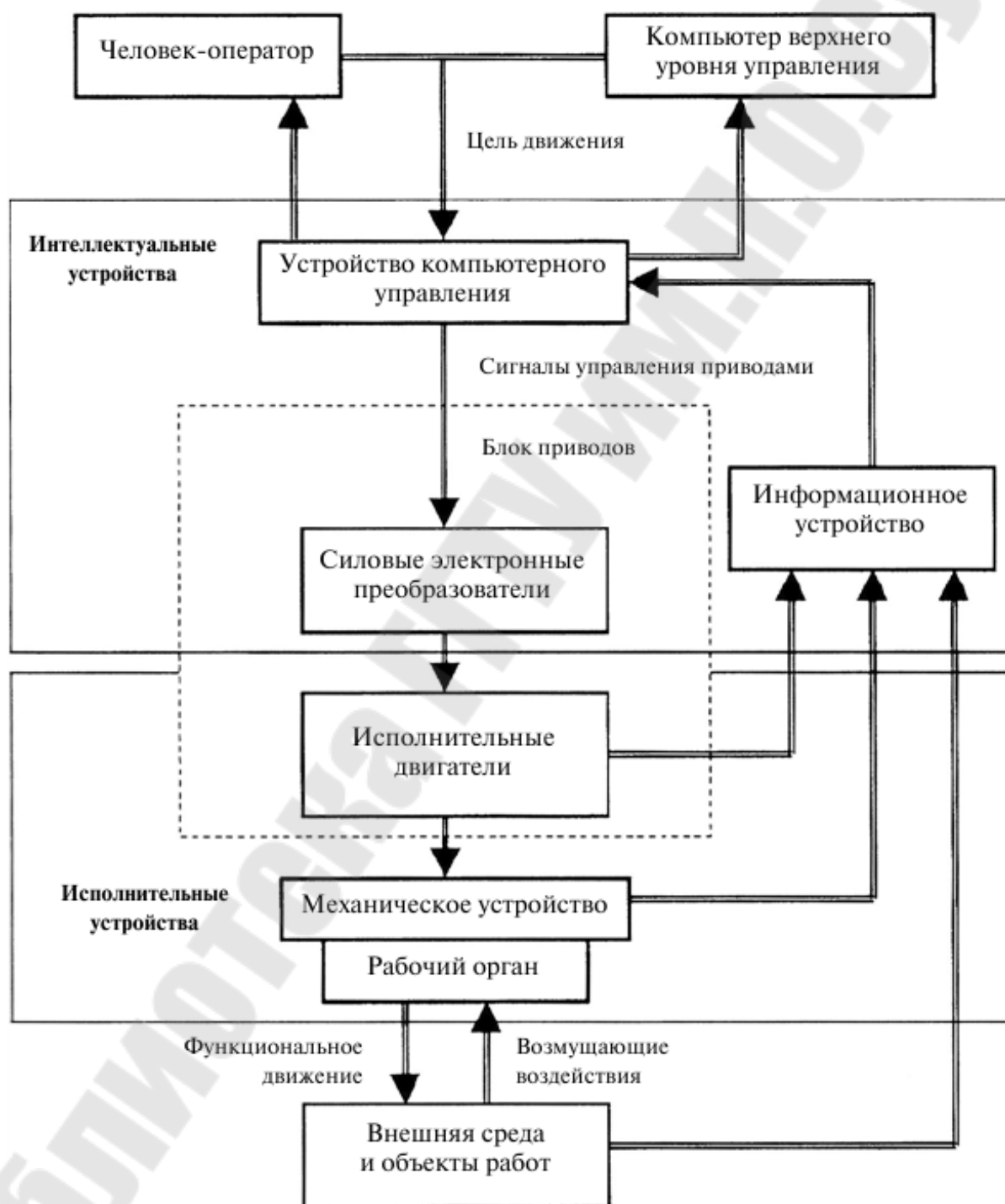


Рисунок 2.2 – Обобщенная структура мехатронной машины

В состав мехатронной машины входят четыре основные части (рисунок 2):

- механическое устройство, конечным звеном которого является рабочий орган;
- блок приводов, включающий в себя силовые преобразователи и исполнительные двигатели;
- устройство компьютерного управления, на вход которого поступают команды человека-оператора либо ЭВМ верхнего уровня управления;
- информационное устройство, предназначенное для получения и передачи в устройство компьютерного управления данных о реальном движении машины и о фактическом состоянии ее подсистем.

Механическое устройство и двигатели объединены в группу исполнительных устройств. В состав группы интеллектуальных устройств включены электронная, управляющая и информационная части машины.

Устройством компьютерного управления называют комплекс аппаратных и программных средств, вырабатывающий сигналы управления для блока приводов машины. В состав комплекса обычно входят задающие устройства (например, джойстики и рукоятки), пульт управления оператора, вычислительные и преобразующие устройства, периферийные устройства ввода-вывода информации. Устройство компьютерного управления выполняет следующие основные функции:

- 1) управление функциональными движениями мехатронной машины в реальном масштабе времени;
- 2) координация управления механическим движением с сопутствующими внешними процессами;
- 3) взаимодействие с человеком-оператором через человеко-машинный интерфейс в режимах программирования (режим off -line) и непосредственно в процессе движения (режим on-line);
- 4) обмен данными с внешними устройствами (информационным устройством, блоком приводов, компьютером верхнего уровня, периферийными устройствами).

Информационное устройство предназначено для сбора и передачи в устройство управления информации о фактическом состоянии внешней среды и движущейся мехатронной машины. В соответствии с рисунком 2.2 (представленной блок-схеме) в информационном устройстве можно выделить три группы сенсоров:

1) датчики информации о состоянии внешней среды и объектов работ (системы технического зрения, локационные датчики и дальномеры и т. д.);

2) датчики информации о движении механической части (датчики перемещений, скоростей, ускорений, сил и моментов);

3) датчики обратной связи блока приводов (дают информацию о текущих значениях электрических токов и напряжений в силовых преобразователях).

Механическое устройство мехатронной машины представляет собой многосвязный механизм, кинематическую цепь которого образуют движущиеся звенья, составляющие кинематические пары. Конечным звеном кинематической цепи является рабочий орган. Рабочий орган мехатронной машины – это составная часть механического устройства для непосредственного выполнения технологических операций и вспомогательных переходов. Примерами рабочих органов в робототехнике являются механические схваты, вакуумные и электромагнитные захватные устройства, сварочные клещи (для точечной сварки), инструментальные головки для механообработки и лазерных операций, окрасочный пистолет.

Таким образом, рабочий орган – это управляемый модуль, который может иметь несколько степеней подвижности и состоять из нескольких элементов, поэтому при его разработке также могут использоваться мехатронные принципы интеграции.

Система интеллектуального управления машиной (комплекс верхнего уровня управления на рисунке 2.2) в условиях неполной информации обычно реализуется в виде комплекса программных средств на компьютере верхнего уровня управления. При отсутствии такого комплекса ИММ превращается в интеллектуальный мехатронный модуль движения (ИММД).

2.3 Уровни мехатронных модулей

В соответствии с признаком синергетического объединения, исторически мехатронные модули можно разделить на несколько уровней.

Мехатронные модули первого уровня представляют собой объединение только двух исходных элементов (чаще всего механического и электрического или гидравлического, пневматического). Типичными примерами модулей первого поколения могут служить «моторредукторы», «мотор-колесо», где механический редуктор и колесо вме-

сте с управляемым двигателем выпускаются как единый функциональный элемент.

Мехатронные модули второго уровня появились в 80-е годы в связи с развитием новых электронных технологий, которые позволили создать миниатюрные датчики и электронные блоки для обработки их сигналов. В этих модулях была достигнута интеграция трех устройств различной физической природы: механических, электротехнических и электронных. На базе мехатронных модулей данного класса созданы управляемые энергетические машины (турбины, генераторы), станки и промышленные роботы с числовым программным управлением.

Мехатронные модули третьего уровня возникли в связи с появлением на рынке сравнительно недорогих микропроцессоров и контроллеров на их основе. По сравнению с модулями второго уровня они дополнительно имеют аппаратно и программно-встроенную компьютерную часть, что позволяет называть их интеллектуальными мехатронными модулями движения. В результате достигается интеграция четырех и более компонентов: высокоточных и компактных механических узлов, прецизионных информационно-измерительных устройств, вычислительных средств и современных технологий управления.

На четвертом уровне интеграции из мехатронных модулей komponируются многокоординатные интеллектуальные мехатронные машины, роботы и робототехнические системы.

Пятый уровень интеграции предполагает создание самодостаточной системы интеллектуальных многофункциональных мехатронных машин для реконфигурируемого производства, построенного по принципу клеточного строения живых организмов из многофункциональных ячеек. Это, по существу, означает переход от основанного на декомпозиции модульного построения технических систем к системно оптимизированным единым структурам. Процесс создания однородных структур уже начался с взаимного проникновения, а затем и слияния информационных компонентов в единую структуру, реализующую функциональные компоненты подобно мультиагентным системам в компьютерных сетях. Эта тенденция должна распространиться далее и на силовые компоненты, например, за счет использования в мехатронных технологиях «активных» материалов, которые способны трансформировать энергию определенного физического поля (электрического, магнитного, теплового и т. п.) в различные механические

эффекты изменения геометрических размеров тел (пьезоэффект, сплавы с памятью формы, магнитострикционные и другие физические эффекты).

2.4 Интеллектуализация мехатронных и робототехнических систем. Основой интеллектуализации мехатронных и робототехнических систем в первую очередь являются интеллектуальные системы управления. Они априорно ориентированы на работу в условиях неполной и нечеткой исходной информации, неопределенности внешних возмущений и среды функционирования. Такие повышенные требования к системам управления диктуют необходимость привлечения нетрадиционных подходов к управлению с использованием методов искусственного интеллекта и современных информационных технологий. В отличие от традиционных систем управления интеллектуальные системы ориентированы на обработку и использование знаний, под которыми надо понимать закономерности предметной области (принципы, связи, законы), полученные в результате практической деятельности и профессионального опыта, позволяющие специалистам ставить и решать задачи в этой области.

Современные информационные технологии обладают алгоритмами, позволяющими формировать, обрабатывать и использовать знания для решения задач управления сложными объектами.

Построенные таким образом системы управления называются интеллектуальными.

2.5 Принципы организации интеллектуальных систем управления робототехники и мехатроники

Класс интеллектуальных систем определяется тем, в какой степени система обеспечивает выполнение следующих пяти принципов организации интеллектуальных систем управления:

- 1) наличие тесного информационного взаимодействия управляющих систем с реальным внешним миром и использование специально организованных информационных каналов связи;
- 2) принципиальная открытость систем для повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения;
- 3) наличие механизмов прогноза изменений внешнего мира и собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире;

4) построение управляющей системы в виде многоуровневой иерархической структуры в соответствии с правилом: повышение интеллектуальности и снижение требований к точности по мере повышения ранга иерархии в системе (и наоборот);

5) сохраняемость функционирования (возможно, с некоторой потерей качества или эффективности) при разрыве связей или потере управляющих воздействий от высших уровней иерархии управляющей структуры.

Первый принцип подчеркивает непосредственную связь интеллектуальных управляющих систем с внешним миром. Находясь в непрерывном взаимодействии с внешним миром, интеллектуальные системы получают из него всю необходимую информацию для принятия решений и пополнения знаний. Сама управляющая система в свою очередь может оказывать на внешний мир активное воздействие в результате реализации собственного поведения.

Модель знаний о внешнем мире интеллектуальной системы должна предполагать возможность изменений внешнего мира и знаний о нем в результате воздействий на него системы. Выполнение принципа информационного взаимодействия системы с внешним миром означает, что любые упрощения модели состояний, вероятностных описаний, игр автоматов со средой для представления событий реального внешнего мира непригодны. Именно в этом и состоит специфика систем управления рассматриваемого класса.

Принципиальная открытость систем в соответствии со вторым принципом обеспечивается наличием таких подсистем высшего ранга в иерархической структуре, как самонастройка, самоорганизация и самообучение. Знания интеллектуальной системы управления состоят из двух частей – постоянных (проверенных) знаний, которыми система обладает и постоянно пользуется, и временных (проверяемых) знаний, в которых системы не уверена, с которыми она экспериментирует в процессе обучения. Знания второго типа либо отбрасываются системой, либо переходят в знания первого типа в зависимости от результатов анализа своего поведения во внешнем мире. Выполнение второго принципа требует организации в управляющей системе процесса приобретения и пополнения знаний.

В соответствии с третьим принципом управляющую систему нельзя считать в достаточной мере интеллектуальной, если она не обладает возможностью прогноза изменений самого внешнего мира и собственного в нем поведения. Система без прогноза, функциони-

рующая в динамически меняющемся внешнем мире, может попасть в критическую ситуацию, из которой не сможет найти выхода из-за временных ограничений на работу механизмов формирования управляющих воздействий, определяющих ее поведение, адекватное сложившейся ситуации.

Четвертый принцип позволяет наметить пути построения моделей сложных управляющих систем в тех случаях, когда неточность знаний о модели объекта или о его поведении можно скомпенсировать увеличением числа уровней интеллектуальности, а также использованием совершенных механизмов принятия решений в условиях неопределенности в соответствующих алгоритмах управления.

Пятый принцип устанавливает лишь частичную потерю интеллектуальности (но не прекращение функционирования) при отказах в работе высших уровней иерархии системы. Сохранение автономного функционирования в рамках более простого (автономного) поведения системы, характерного для нижних уровней структуры управления, также чрезвычайно важно для автономно функционирующих систем в реальном внешнем мире.

Приведенные пять принципов организации структуры интеллектуальной системы управления определяют класс исследуемых систем.

Система управления, не имеющая базы знаний, неспособная к самообучению и адаптации, не умеющая прогнозировать события и построенная с использованием только методов классической теории автоматического управления (ТАУ), имеет степень интеллектуальности в малом.

Система управления, имеющая базу знаний, способная к самообучению и адаптации, но не умеющая прогнозировать события, имеет степень интеллектуальности в большом.

Система управления, имеющая базу знаний, способная к самообучению, адаптации и прогнозу событий называется интеллектуальной в целом.

Определение степени интеллектуальности в малом, в большом и в целом введено по аналогии с устойчивостью в малом, большом и целом для классических систем автоматического управления.

Известны два основных направления интеллектуализации мехатронных систем:

- 1) разработка высокоскоростных аппаратных средств вычислительной техники;

2) разработка специальных алгоритмов на основе современных методов и технологий обработки знаний.

Россия идет по пути использования в основном второго направления, в то время как Япония предпочитает в основном первый путь интеллектуализации.

2.6 Миниатюризация мехатронных и робототехнических систем. Вопросы миниатюризации являются ключевыми во всех отраслях промышленности – микроэлектронике, нанотехнологиях, генетике и др. Микроэлектроника обеспечила существенное развитие мехатроники. Современные микроэлектронные устройства открыли принципиально новые возможности для объединения (интегрирования) механики и электроники, которые по своему уровню значительно превосходят существовавшую ранее электромеханику.

Микроэлектроника играет ключевую роль в реализации машин нового поколения – микроэлектромеханических систем (МЭМС) или микросистемных технологий (MST). МЭМС (или MEMS) – конструктивно представляют сформированные на одной подложке датчики, исполнительные механизмы, устройства управления с размерами элементов до нескольких единиц микрон и менее, имеющие, как правило, трехмерную структуру. Они изготавливаются большей частью по полупроводниковой технологии: поверхностная и объемная микрообработка материалов (поликристаллический кремний), LIGA и SIGA – технологии, а также MUMPs – процесс. Микромашины не собирают из готовых деталей, а целиком выращивают слой за слоем на кремниевой подложке, применяя технологии осаждения слоев поликремния (поликристаллического кремния) и двуокиси кремния, фотолитографии, травления и планаризации (сглаживания), т. е. те технологии, что давно применяются для изготовления микроэлектроники. В конце технологического процесса изготовления микромашины все ее детали уже находятся на своих местах в правильном соединении между собой, но двигаться еще не могут, потому что как бы «утоплены» в толстом слое двуокиси кремния, которую необходимо вытравить кислотой. Толщина слоев поликремния составляет 1–2 микрометра, что соответствует толщине шестерней, маховиков, шатунов, рычагов, собачек, храповиков, пружин и прочих составляющих механизма.

Широкое применение MST-технологии нашли при разработке микророботов. Микророботы по внешнему виду могут быть копией макророботов, но чаще на них совершенно не похожи. По определе-

нию микроробот – это микроэлектромеханическое устройство с программируемой последовательностью действий и способностью выполнять основные операции с точностью от 0,1 мкм до 1 нм и занимающее объем кратный 10^{-3} м^3 (1 мм^3).

Наукой и техникой пройден пока только первый этап развития микросистем – создание микроустройств обработки информации, принятия решений и управления – микроэлектроники. Эти достижения явились базой для работ второго этапа построения микросистем – создания компактных микроустройств и микросистем с использованием единого технологического цикла при изготовлении сенсорной, управляющей и силовой подсистем.

Второй этап развития микросистемной техники стал возможен лишь с появлением таких технических решений, как сканирующие туннельные микроскопы (СТМ). В последние годы в различных странах появилось большое количество экспериментальных микроустройств и микросистем, нацеленных на решение задач в различных областях науки и техники. Происходит их дальнейшая миниатюризация, расширение их функциональных возможностей, при этом создаются универсальные технические решения, которые можно без существенных изменений применять как в военной, так и в гражданской области. Но в то же самое время микроустройства второго этапа развития микросистемотехники строятся в виде модульных схем, где различные элементы подсистем могут быть выполнены в виде отдельных микросхем различного функционального назначения, соединенных между собой электрическими цепями.

На третьем этапе прогнозируется создание микроустройств определенного типа, во многом копирующих структуры живых организмов (биоморфы). Работы по третьему этапу уже начались, и появились определенные успехи. При этом следует заметить, что работы на всех трех этапах могут идти как самостоятельно, так и во взаимодействии и взаимодополнении с другими этапами.

В последнее время в области микро- и миниробототехники на стыке таких, казалось бы, разных областей знаний, как микроэлектроника, микросистемотехника, нейрокибернетика, бионика и биология появились новые направления, которые можно объединить под названием биоробототехника. Наиболее интенсивный характер этих работ наблюдается в основном применительно к военной робототехнике. Одним из перспективных направлений современной биомикроминиробототехники является направление, связанное с созданием ро-

ботов-биогибридов. Суть этого подхода заключается в том, что управление осуществляется живым организмом – насекомым или мелким животным, путем воздействия электрическими сигналами или иным способом на его нервную систему. Такие биомикро- или биомини-роботы могут использоваться как мобильные устройства для решения целого спектра задач. В частности, они могут быть использованы для решения задач химической и радиационной разведки, поиска людей под завалами при ликвидации последствий аварий и катастроф, для охраны и наблюдения за объектами, а также для обнаружения взрывных устройств и разминирования.

В настоящее время для решения многих задач весьма перспективно использование мобильных биороботов, создаваемых на основе биоорганизмов, высокочувствительных сверхминиатюрных сенсорных устройств и управляющих электронных систем. При этом могут создаваться биотехнические или бионические системы разной степени сложности.

В наиболее простом случае биообъект может нести систему, отслеживающую его передвижения, и необходимый набор датчиков для оценки состояния окружающей среды, информация от которых или передается в стационарную систему сбора и обработки информации по проводным и беспроводным каналам связи, или может регистрироваться аппаратурой, размещаемой на биообъекте.

ТЕМА 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

3.1 Структурный и технологический базисы мехатроники

Структурная пирамида мехатроники, учитывающая целостность мехатронного объекта, состоящего из трех главных частей – механической, электронной и информационной, может быть представлена в форме пирамиды (рисунок 3.1) [1].

Оси координат (базовые направления) пирамиды – механика, электроника, информатика – соответствуют трем главным (базовым) частям мехатронной системы. На координатных осях отмечены современные уровни развития этих частей (прецизионная механика, микроэлектроника, информационные технологии). Попарная интеграция базовых направлений – грани пирамиды образуют три гибридных направления (электромеханика, компьютерные системы управления, системы автоматизированного проектирования механических систем).

На стыке гибридных направлений возникает мехатроника. Базовые и гибридные направления определяют технологический базис мехатроники (рисунок 3.2).



Рисунок 3.1 – Структурная пирамида мехатроники



Рисунок 3.2 – Технологическая пирамида мехатроники

Пирамидальная форма и состав технологической пирамиды мехатроники полностью соответствует ее структурному базису. Фундаментом технологического базиса мехатроники являются новые технологии всех базисных направлений – прецизионные и модульные технологии механики, микроэлектронные и информационные технологии. Объединения указанных технологий представляют комбинированные технологии, принадлежащие граням технологической пирамиды, к которым можно отнести:

- гибридные технологии электромеханики;
- цифровые технологии управления движением;
- технологии автоматизированного проектирования.

3.2 Гибридные технологии электромеханики мобильные микророботы

Все компоненты мехатронных модулей делятся на две большие группы:

- 1) исполнительные элементы, к которым отнесены механические и электротехнические элементы (двигатели, преобразователи движения, направляющие, тормоза и т. д.);
- 2) интеллектуальные элементы, куда входят силовые электронные блоки, информационные и управляющие элементы.

Гибридные технологии предполагают наличие двух этапов технологической интеграции элементов первой и второй группы элементов. К первому относятся операции изготовления гибридных элементов, а ко второму – гибридная сборка мехатронных модулей и машин из гибридных элементов. При этом допускается, что элементы обеих групп изготавливаются независимо и параллельно на различных технологических линиях, либо приобретаются у различных производителей (по заранее согласованным спецификациям). Гибридная же сборка соответствует конструкторской идее объединения (интеграции) разнообразных гибридных элементов в едином корпусе.

Мехатронный модуль движения состоит из следующих основных частей (рисунок 3.3). Главной особенностью современного этапа развития мехатроники является создание принципиально нового поколения модулей - интеллектуальных мехатронных модулей.

Интеллектуальный мехатронный модуль (ИММ) – конструктивно и функционально самостоятельное изделие с синергетической интеграцией механической, электрической (электротехнической), информационной и компьютерной (электронной) частей, которое можно

использовать индивидуально и в различных комбинациях с другими модулями. Таким образом, по сравнению с мехатронными модулями движения (ММД), в конструкцию ИММ дополнительно встраивают микропроцессорные вычислительные устройства и силовые электронные преобразователи, что придает этим модулям интеллектуальные свойства и является их главным отличающим признаком от ММД.

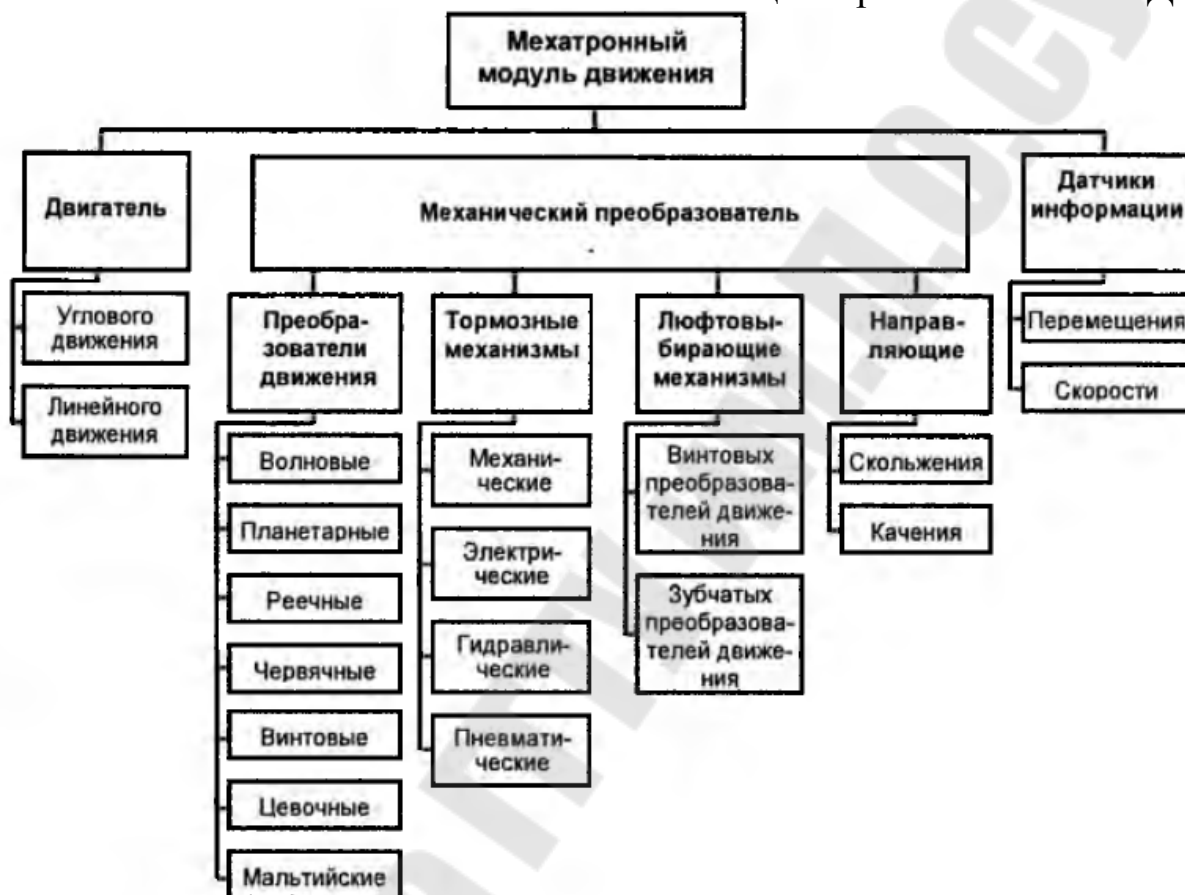


Рисунок 3.3 – Структура мехатронного модуля движения

На рисунке 3.4 изображены интеллектуальные мехатронные модули фирмы SIEMENS SIMODRIVE POSMO A и SIMODRIVE POSMO SI соответственно, включающие в себя электродвигатель 1, механический преобразователь 2 и силовой преобразователь 3. Синергетическая интеграция указанных элементов составляет структурный базис мехатроники. Мехатронная идея синергетической интеграции элементов различной физической природы становится все более популярной среди разработчиков и потребителей наукоемкой продукции. По данным на 2002 г. встроенные контроллеры управления движением применяют в 35,1 % мехатронных упаковочных машин, причем в течение 1,5...2 лет доля машин этого класса увеличивается на 8...10 %. Аналогичная тенденция наблюдается и в других областях применения меха-

тронных систем, в частности, в автоматизированном машиностроении.

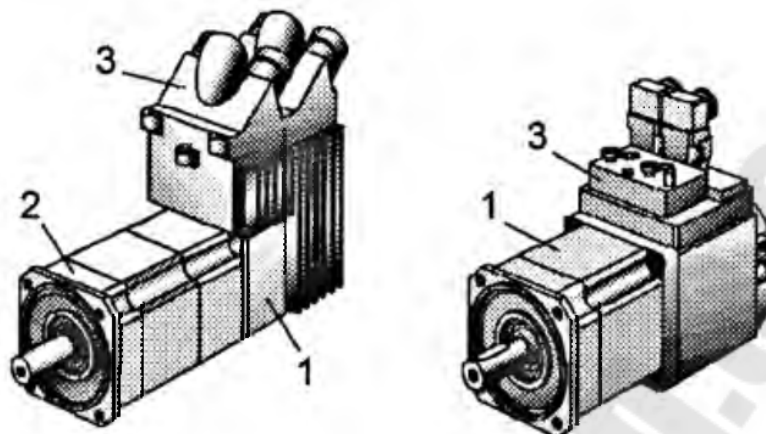


Рисунок 3.4 – Примеры реализации мехатронного модуля

Основные преимущества, которые дает применение интеллектуальных мехатронных модулей:

- способность ИММ выполнять сложные движения самостоятельно, без обращения к верхнему уровню управления, что повышает автономность модулей, гибкость и живучесть мехатронных систем, работающих в изменяющихся и неопределенных условиях внешней среды;
- упрощение коммуникаций между модулями и центральным устройством управления (вплоть до перехода к беспроводным коммуникациям), что позволяет добиваться повышенной помехозащищенности мехатронной системы и ее способности к быстрой реконфигурации;
- повышение надежности и безопасности мехатронных систем благодаря компьютерной диагностике неисправностей и автоматической защите в аварийных и нештатных режимах работы;
- создание на основе ИММ распределенных систем управления с применением сетевых методов, аппаратно-программных платформ на базе персональных компьютеров и соответствующего программного обеспечения;
- использование современных методов теории управления (программных, адаптивных, интеллектуальных, оптимальных) непосредственно на исполнительном уровне, что существенно повышает качество процессов управления в конкретных реализациях;
- интеллектуализация силовых преобразователей, входящих в состав ИММ, для реализации непосредственно в мехатронном модуле ин-

теллектуальных функций по управлению движением, защите модуля в аварийных режимах и диагностики неисправностей;

- интеллектуализация сенсоров для мехатронных модулей позволяет добиться более высокой точности измерения, программным путем обеспечив в самом сенсорном модуле фильтрацию шумов, калибровку, линеаризацию характеристик вход/выход, компенсацию перекрестных связей, гистерезиса и дрейфа нуля.

Основным фактором, сдерживающим использование интеллектуальных мехатронных модулей в серийных изделиях, является их высокая цена, хотя в последние годы она постоянно снижалась. Это обусловлено рядом технологических факторов:

- бурным развитием в последнее время аппаратных устройств и информационных технологий, ориентированных на задачи управления движением;
- появлением полупроводниковых приборов нового поколения (силовых полевых транзисторов, биполярных транзисторов с изолированным затвором, тиристоров с полевым управлением);
- переходом на новую элементную базу в системах управления движением – это цифровые сигнальные процессоры (DSP-процессоры) и блоки FPGA (Field Programmable Gate Arrays);
- разработкой гибридных технологий мехатроники, позволяющих встраивать электронные и вычислительные устройства в механические узлы.

Гибридные технологии изготовления нашли широкое применение в производстве микроэлектромеханических систем (МЭМС). Типичными представителями МЭМС являются мобильные микророботы. Развитие МЭМС-технологий позволило создать сенсоры, в конструкции которых реализовано объединение функций измерения текущих параметров механического движения, их преобразования и обработки по заданным алгоритмам в едином блоке – интеллектуальные сенсоры.

3.3 Цифровые технологии управления. Современные технологии управления движением мехатронных систем базируются на достижениях микроэлектроники и новых информационных технологиях. Аппаратные средства обычно конструктивно встраиваются в мехатронные модули. Технологически это достигается за счет высокой плотности схем, уменьшения монтажных соединений и использования твер-

дотельных элементов. Аппаратные средства управления включают в себя:

- силовые преобразователи, которые являются связующим звеном между устройством компьютерного управления и исполнительными органами (двигателями);
- цифровые сигнальные процессоры, устанавливаемые в информационно-измерительных каналах для нормирования фильтрации, аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразования, оцифровки и кодирования аналоговых сигналов;
- программируемые интегральные микросхемы, позволяющие программно реализовать необходимые управляющие функции – декодирование сигналов, цифровую широтно-импульсную модуляцию, различные математические операции, необходимые для реализации управления;
- контроллеры движения.

В области микроэлектроники основными типами силовых электронных приборов являются силовые полевые транзисторы (MOSFET), биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), коммутируемые тиристоры (GTO) и интеллектуальные силовые модули (IPM). Новое поколение приборов отличается высоким быстродействием (для транзисторов MOSFET частота коммутаций до 100 кГц), высокими значениями коммутируемых токов и напряжений (для транзисторов IGBT предельная сила коммутируемого тока до 2400 А, а предельное коммутируемое напряжение до 3300 В), малыми коммутативными потерями и малой мощностью управления. В мехатронике интеллектуальные модули стали базой для создания новых силовых преобразователей в каналах управления движением, а также защитных и диагностирующих устройств.

3.4 Цифровые сигнальные микропроцессоры, их архитектура, области применения. В настоящее время ряд фирм INTEL, ANALOG DIVICES, ATMEL, MICROCHIP, TEXAS INSTRUMENTS и другие разработали широкую линейку цифровых сигнальных процессоров (DSP – digital signal processors). DSP – специализированный микропроцессор, предназначенный для цифровой обработки сигналов (обычно в реальном масштабе времени).

Архитектура сигнальных процессоров имеет некоторые важные особенности по сравнению с микропроцессорами настольных компьютеров. Сигнальные процессоры строятся на основе «Гарвардской

архитектуры», отличительной особенностью которой является то, что программы и данные хранятся в различных устройствах памяти – памяти программ и памяти данных. Поэтому DSP может производить одновременные обращения как к памяти команд, так и к памяти данных в отличие от архитектуры фон Неймана, которая предполагает раздельное обращение к устройствам памяти (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5. Гарвардская архитектура DSP (цифрового сигнального процессора)

Области применения DSP:

- управление динамическими технологическими процессами;
- коммуникационное оборудование;
- анализаторы спектра;
- распознавание речи и изображений;
- речевые и музыкальные синтезаторы;
- системы гидро- и радиолокации;
- другие области, где необходима быстродействующая обработка сигналов (в том числе в реальном времени).

По назначению DSP делятся на две группы:

1. DSP общего назначения.
2. Проблемно-ориентированные DSP. «Проблемная ориентация» обычно относится к набору встроенных специализированных периферийных устройств. Например, DSP, предназначенные для управления электродвигателями, могут содержать на кристалле генераторы сигналов ШИМ, контроллеры локальной промышленной сети и т. д. В цифровых фото- и видеокамерах применяются DSP с модулями кодирования / декодирования MP3, JPG, AAC, MPEG1, MPEG4 и др.

Среди проблемно-ориентированных DSP выделяются гибридные DSP – специализированные устройства, сочетающие в себе функцию микроконтроллера и цифрового сигнального процессора. Обычно такие изделия предназначены для выполнения одной функции – например, управления электрическими двигателями или другими объектами в реальном масштабе времени.

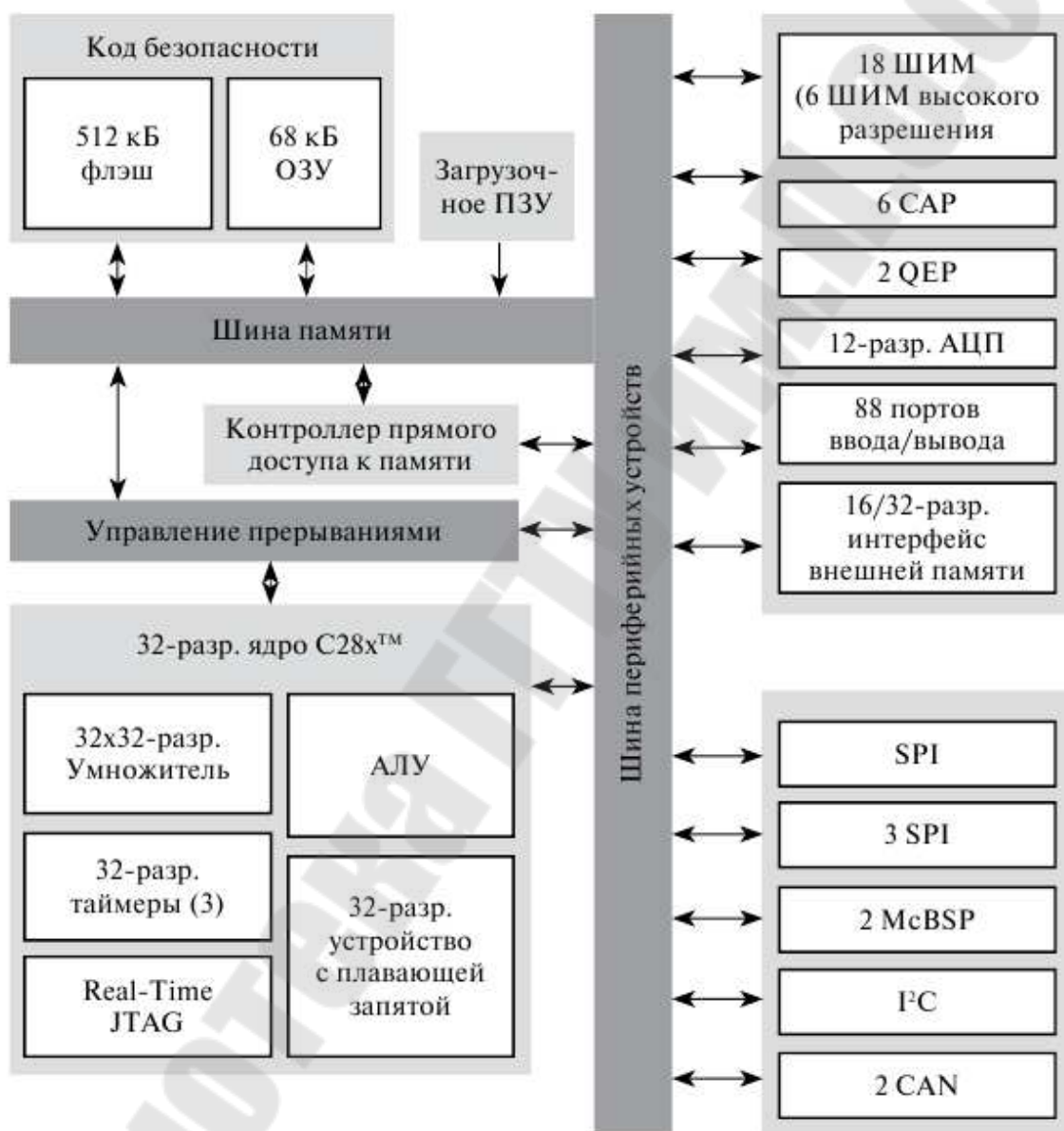


Рисунок 3.6. Блок-схема архитектуры TMS320F28335

Американская компания Texas Instruments производила цифровые сигнальные микропроцессоры на двух DSP платформах TMS320C2000 (рисунок 3.6) и TMS320C6000 для встроенных приложений.

3.5 Программируемые вентильные матрицы. (FPGA – Field Programmable Gate Arrays). Устройства данного типа представляют собой интегральные микросхемы, обладающие уникальным сочетанием очень высокой производительности (скорость вычислений соизмерима с аппаратными вычислительными средствами) с возможностью программирования как обычных микропроцессорных устройств.

На выходе блоков FPGA можно сформировать широтно-модулированный сигнал, который имеет цифровое представление. Микросхема FPGA состоит из следующих основных блоков:

- блок ввода-вывода (БВВ), осуществляющий соединение внутренней логики кристалла с выводами корпуса микросхемы;
- конфигурируемые логические блоки (КЛБ), реализующие логические и регистровые функции;
- блочная память;
- модули управления синхронизацией (DLL);
- трассировочные ресурсы для соединения всех элементов.

Программирование микросхем FPGA в отличие от традиционных логических микросхем осуществляет пользователь. Для этого применяются специальное программное обеспечение, которое включает в себя: модули текстового и схемного ввода, моделирования, автоматической трассировки, создания и загрузки конфигурационных данных, специальные библиотеки макросов. Разработчик с внешнего устройства имеет возможность многократно загружать проект в микросхему и тестировать ее работу на реальном изделии.

3.6 Микроконтроллеры, структура, назначение. В системах управления мехатронными и робототехническими системами преобладают встроенные контроллеры движения, которые технологически реализованы на отдельной плате. Лишь в некоторых случаях используются специализированные аппаратно оформленные сепаративные контроллеры.

На практике широко применяются микроконтроллеры семейства AVR фирмы Atmel. Это одна из самых популярных в наше время микропроцессорных серий. Микроконтроллеры серии AVR относятся к классу восьмиразрядных микроконтроллеров. Это означает, что подавляющее большинство операций процессоры производят с восьмиразрядными двоичными числами. Все ячейки памяти и большинство регистров микроконтроллера также восьмиразрядные. Исключение составляет память программ, которая состоит из шестнадцатиразряд-

ных ячеек. Микроконтроллеры AVR изготавливаются по КМОП – технологии, благодаря которой они имеют низкий ток потребления. Большинство команд микроконтроллера выполняются за один такт.

Более совершенным является микроконтроллер MSP-430 фирмы Texas Instruments. Одно из преимуществ микроконтроллеров MSP-430 – чрезвычайно простая и освоенная система команд. Структура кристалла из «линейки» MSP-430 показана на рисунок 3.7.

Предоставленные пользователю средства разработки программного обеспечения позволяют работать как в классическом ассемблеровском коде, так и на языках высокого уровня (например, на СИ). Фирма Texas Instruments выпускает отладочные средства (для отладки программ) – так называемые Starter Kits (стартовые наборы), в комплект которых входят: печатная плата с установленным микроконтроллером, ЖКИ-индикатор, кнопки, контактные разъемы для подключения других электронных компонентов.

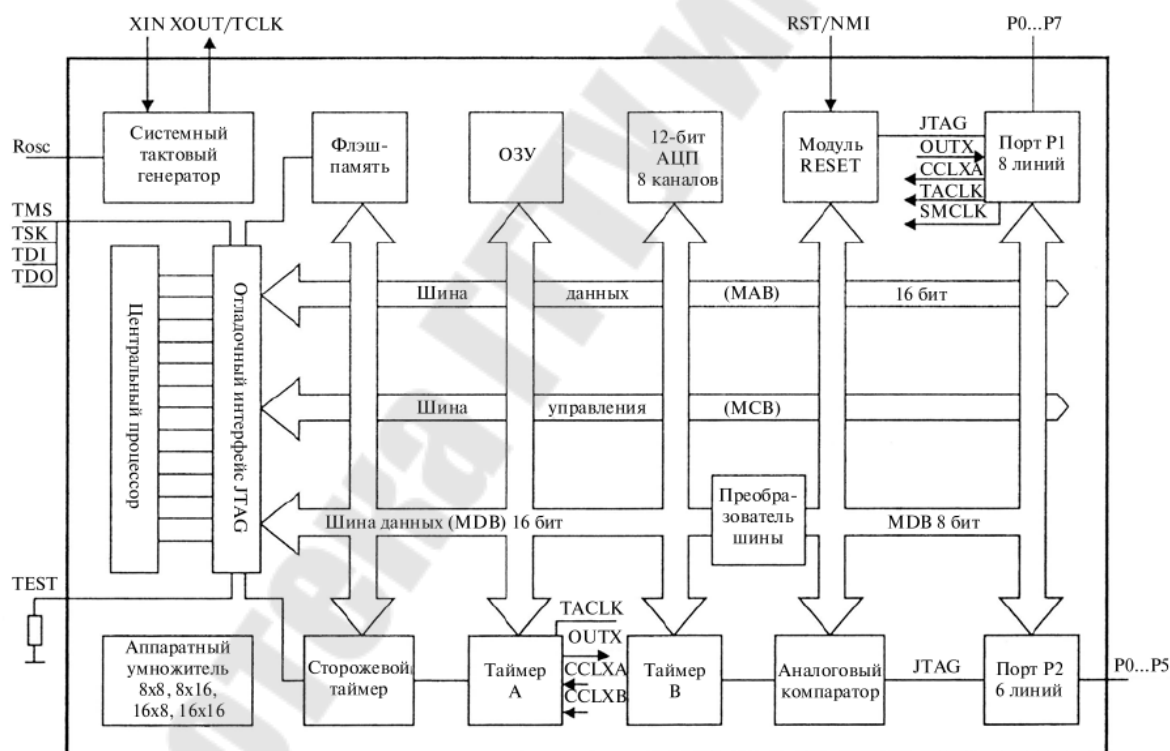


Рисунок 3.7 – Структура микроконтроллеров MSP-430 F

Еще одно направление отладочных средств – эмуляторы (программа или микросхема, позволяющая осуществить эмуляцию – точное выполнение микроконтроллером программы, записанной в системе другой ЭВМ).

Архитектура MSP-430 является дальнейшим развитием известной архитектуры ЭВМ PDP11, ныне ставшей достоянием истории. Буква «F» в обозначении говорит о том, что микроконтроллер имеет встроенную внутреннюю flash-память, которая может быть электрически многократно перепрограммирована.

Структура MSP-430 (рис. 9) использует 16-битную упрощенную организацию системы команд RISC-типа (Reduced Instruction Set Computer), которая может производить операции не только над байтами, но и над словами (напомним, что машинное слово состоит из двух байт). Центральный процессор (CPU) идентичен для всех представителей семейства и состоит из трехступенчатого конвейера инструкций, 16-разрядного арифметик-логического (ALU) устройства, 16 внутренних регистров (четыре из которых используют в качестве счетчика команд – PC, указателя стека – SP, регистра состояния – SR, генератора констант – CG).

Счетчик команд предназначен для фиксации текущего адреса исполняемой команды, указатель стека хранит данные о так называемой стековой памяти, регистр состояния сохраняет результаты выполнения команд, генератор констант формирует наиболее часто используемые целые числа. Остальные 12 регистров используются по усмотрению пользователя. ALU выполняет простейшие арифметические действия (сложение, вычитание, сравнение) и логические операции («и», «или», «исключающие «ИЛИ»»).

В состав некоторых модификаций MSP-430 входит 16-разрядный аппаратный умножитель, осуществляющий аппаратное умножение (не в ALU). Умножать можно как комбинации 16-разрядных чисел, так и комбинации 8-разрядных и 16-разрядных чисел. При этом поддерживается умножение со знаком (MPYS) и беззнаковое умножение (MPY), знаковое умножение с накопителем (MACS) и беззнаковое умножение с накопителем (MAC).

ТЕМА 4 ТРЕБОВАНИЯ К МЕХАТРОННЫМ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМ МОДУЛЯМ И СИСТЕМАМ

В настоящее время происходит мехатронизация техносферы – решительный поворот развития производственной и бытовой техносферы в направлении все более широкого внедрения мехатронных и робототехнических систем, построенных с использованием мехатронных технологий. Кроме того, можно констатировать, что проис-

ходит расширение классической механической парадигмы мехатроники, связанное с переходом от компьютерного управления механическими процессами к компьютерному управлению физическими процессами. Этот этап развития мехатроники отражает эволюцию взаимосвязей различных форм движущейся материи – переход от наиболее простых, механических, к более сложным, физическим, формам движения материи.

Указанные тенденции развития мехатроники могут быть реализованы только при условии выполнения новых современных требований к функциональным и структурно-конструктивным показателям мехатронных и робототехнических модулей и систем. Эти требования носят стратегический, тактический и прикладной характер.

4.1 Стратегические, тактические и прикладные требования к функциональным и конструктивно-структурным показателям мехатронных и робототехнических модулей

К стратегическим требованиям можно отнести:

- создание саморазвивающихся (самосовершенствующихся) мехатронных, робототехнических и физико-технических систем различного назначения;
- развитие интеллектуальных систем в направлении технического освоения творческих способностей человека.

Выполнение стратегических требований в свою очередь базируется (определяется) на реализации тактических требований, к числу которых следует отнести:

- развитие систем с переменной структурой;
- разработка алгоритмов самоорганизации системы в процессе ее самоусовершенствования аналогичных эволюционному развитию живой природы;
- дополнительное развитие формальных методов искусственного интеллекта.

Изменение структуры систем может иметь одну из трех целей:

- 1) расширение адаптивных возможностей;
- 2) расширение функциональных возможностей;
- 3) совершенствование систем в процессе эксплуатации.

Структурные изменения можно реализовать путем построения мехатронных систем из функциональных оперативно изменяющихся модулей, адекватно меняющейся обстановке и решаемым задачам.

Структурные изменения могут быть и чисто информационными (алгоритмическими) без изменения материальной части системы.

Разработка алгоритмов самосовершенствования (включая алгоритмы обучения, предусматривающие, в том числе и «обучение с учителем» под руководством человека), построение функционально гибких структурных схем – путь эволюционного развития мехатронных систем, подобный эволюционному развитию живой природы. Дополнительное развитие формальных методов искусственного интеллекта, которые имитируют вербальное (логическое) мышление человека, пойдет по пути технического воспроизведения интуитивных способностей человека, основанных, прежде всего, на образном мышлении. По мнению ученых в области информатики сознательное вербальное мышление человека составляет не более 10 % его мыслительной деятельности, а основной ее объем является подсознательным и в большей части образным. Этим объясняется известный парадокс – чем сложнее задача, тем меньше человек полагается на логику и больше на интуицию, которая основана на образном мышлении. Логическое формализованное мышление связывает воображение, мешает ассоциативному поиску решения творческих задач.

Прикладные требования к функциональным и структурно-конструктивным показателям мехатронных и робототехнических модулей и машин в значительной степени определяются уровнем и возможностями современной науки и техники. Симбиоз имеющегося научного задела в мехатронике и реальных потребностях производства позволяет сформулировать современные прикладные требования к создаваемым в настоящее время мехатронным модулям, машинам и системам:

- выполнение машинами и системами качественно новых служебных и функциональных задач;
- интегрированные приводы;
- ультрапрецизионные микроэлектромеханические системы (MEMS) (в частности, микророботы);
- новые кинематические структуры и конструктивные компоновки многокоординатных машин;
- многофункциональные металлообрабатывающие центры;
- интеллектуальные мехатронные и робототехнические системы;
- дистанционное управление мобильными мехатронными системами.

4.2 Групповое управление. Характерным примером выполнения мехатронной системой новых служебных функций служит система группового управления в распределенных системах.

Проблемы группового управления группой объектов, объединенных одной целью, актуальны для многих сфер. В принципе любая распределенная система, состоящая из отдельных элементов, сталкивается с проблемой группового управления, т. е. с проблемой управления взаимодействием отдельных ее частей для оптимального решения задачи, поставленной перед системой в целом. В настоящее время разработаны и применяются различные стратегии группового управления (рисунок 4.1).

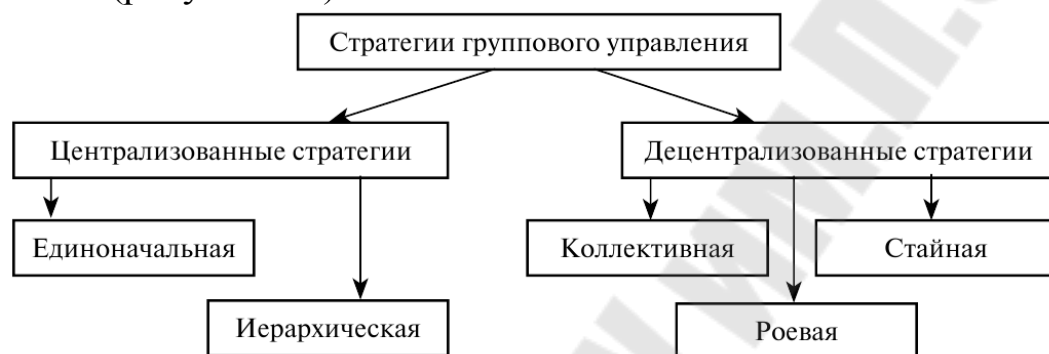


Рисунок 4.1 – Стратегии группового управления

Централизованная единоличная стратегия группового управления предполагает наличие центрального устройства управления (ЦУУ) – командира, принимающего единоличные решения.

Центральная иерархическая стратегия группового управления допускает несколько ЦУУ различного уровня: ЦУУ 1 – первого уровня и ЦУУ 2М – второго уровня, где $M \geq 1$ (одного или более ЦУУ второго уровня).

Децентрализованная коллективная стратегия подразумевает отсутствие у группы центрального устройства управления (командира), но в то же время наличие некоторого канала обмена информацией между объектами группы, с помощью которого отдельные объекты могут координировать и оптимизировать свои действия для достижения общей цели.

Роевая стратегия наиболее эффективно может быть использована при управлении массовыми группами объектов, например, «облаками» микророботов. Данная стратегия подразумевает наличие у каждого отдельного объекта роя ограниченного набора простейших действий, а также ограниченной зоны обмена информацией с ближайшими объектами, входящими в состав роя.

В отличие от коллективной и роевой стратегий группового управления стайная стратегия подразумевает отсутствие не только командира в группе объектов, но и какого-либо прямого канала связи между ними. При этом объекты, входящие в группу, могут получать только опосредованную информацию о действиях других объектов группы путем анализа изменений, происходящих в среде.

Формальную постановку задачи группового управления распределенной системой можно сформулировать следующим образом. Пусть некоторая распределенная система R , состоящая из n подсистем (объектов) R_i ($i=1, n$) функционирует в среде E , причем каждый объект R_i может выполнять некоторый набор действий $A_i = (a_1^i, a_2^i, \dots, a_m^i)$. Объекты и среда, взаимодействуя друг с другом, образуют систему. Необходимо определить такие всех объектов входящих в систему, в результате выполнения которых исходная (начальная) ситуация преобразуется в целевую (конечную) ситуацию, а также достигается экстремум некоторого функционала качества, следующего вида:

$$Y = F(A_1, \dots, A_n, R, E).$$

Централизованная единоначальная стратегия группового управления (рисунок 4.2) имеет следующие преимущества:

- простота организации и соответственно алгоритмизации процедур группового управления;
- высокое качество решения задачи группового управления.

К недостаткам можно отнести:

- низкая живучесть системы;
- длительное время решений задачи группового управления.

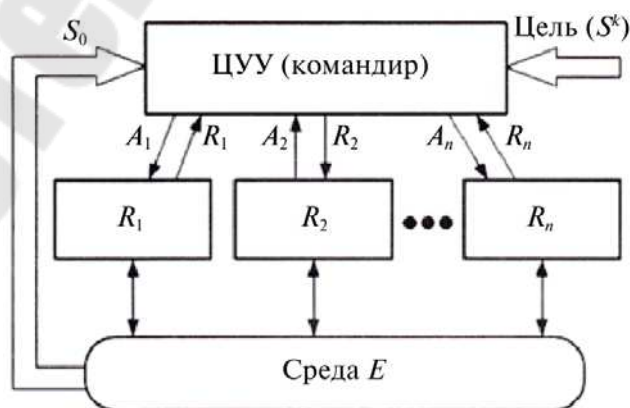


Рисунок 4.2 – Централизованная единоначальная стратегия группового управления.

Централизованная иерархическая стратегия группового управления (рисунок 4.3) отличается следующими преимуществами:

- снижение времени решения задачи группового управления;
- возможность управления большим числом объектов;
- более высокая живучесть.

Недостатки:

- большая временная задержка и возможность искажений при передаче команд управления от верхнего уровня к нижнему;
- снижение качества решения задачи группового управления.

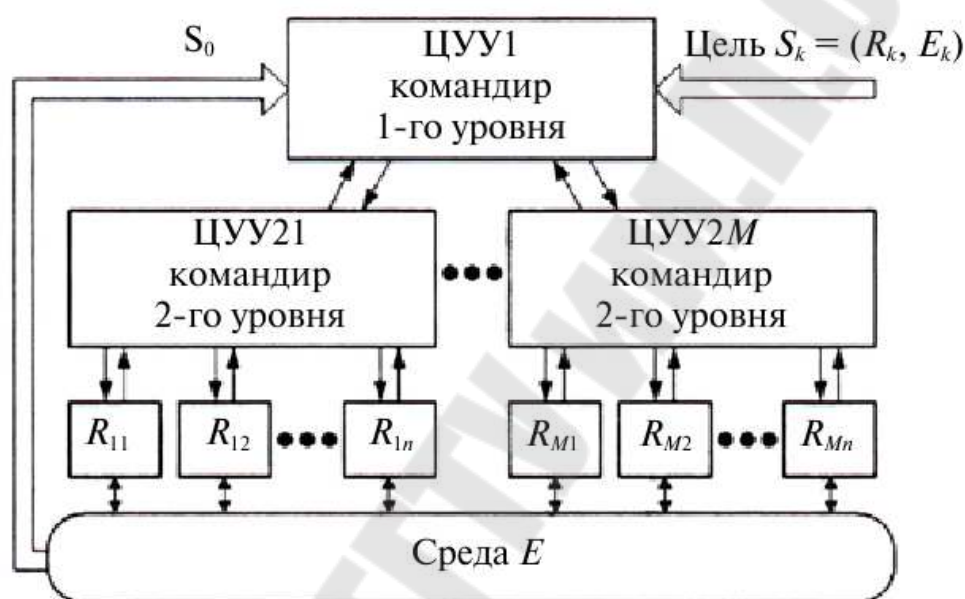


Рисунок 4.3 – Централизованная иерархическая стратегия группового управления.

Децентрализованная коллективная стратегия группового управления (рисунок 4.4) имеет следующие принципы управления:

- 1 Каждый объект имеет полную модель взаимодействия со всеми другими членами группы и средой, а также информационный канал связи со всеми другими членами группы.
- 2 На основании модели поведения объект выбирает такое действие, которое направлено на преобразование текущей ситуации в целевую и дает при этом экстремальное приращение функционалу Y при фиксированных действиях и состояниях других членов группы и среды.
- 3 Если ни одно из возможных действий объекта не дает приращения функционалу Y , то объект переходит к исполнению ранее выбранного действия.

4 В противном случае информация о новом выбранном действии объекта сообщается всем остальным членам группы, после чего объект переходит к п. 2

Она отличается следующими преимуществами:

- малое время принятия решения задачи группового управления;
- повышенная живучесть.

Имеет недостатки:

- невысокое качество решения задачи группового управления;
- высокие требования к надежности информационного канала связи.

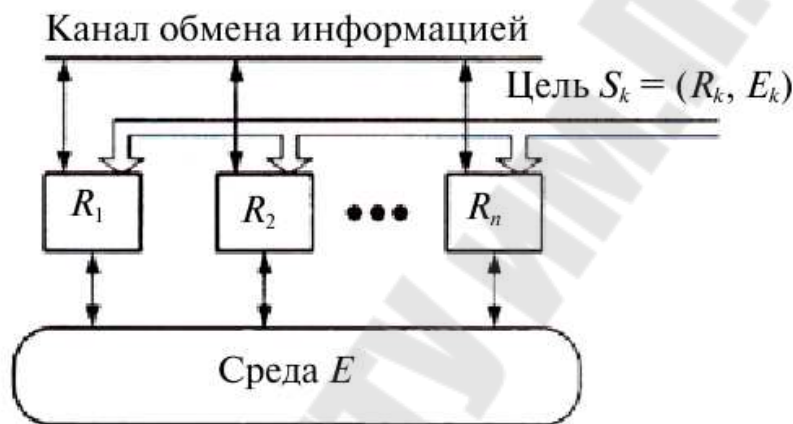


Рисунок 4.4 – Децентрализованная коллективная стратегия группового управления

Примерами программных моделей, использующих коллективную стратегию группового управления являются: дистанционное зондирование поверхности группой БПЛА, система коллективного управления группой складских роботов-штабелеров, распределенная мультиплексная система управления автомобилем на базе унифицированных бортовых контроллеров.

Децентрализованная роевая стратегия группового управления (рисунок 4.5) имеет следующие принципы управления:

Принципы управления:

1 Каждый объект обладает моделью взаимодействия с ограниченным подмножеством объектов, средой и информационным каналом связи с ограниченным подмножеством объектов.

2 На основании модели поведения объект выбирает такое свое действие, которое при фиксированных действиях других объектов

подмножества направлено на достижение целевой ситуации и дает экстремальное приращение функционалу Y .

3 Осуществляется итерационная оптимизация групповых действий в подмножестве до тех пор, пока никакие новые действия объектов не дают приращения функционалу Y .

Отличается следующими преимуществами:

- высокая живучесть;
- малое время принятия решения задачи группового управления;
- возможность управления массово-применяемыми объектами.

Имеет следующие недостатки:

- невысокое качество решения группового управления;
- невысокая скорость реакции на внешние объекты

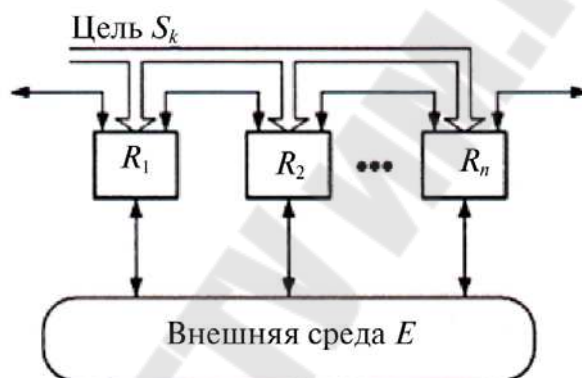


Рисунок 4.5 – Децентрализованная роевая стратегия группового управления

Децентрализованная стайная стратегия группового управления (рисунок 4.6) имеет следующие принципы управления:

1 Каждый объект имеет свою индивидуальную модель взаимодействия со средой, причем какая-либо прямая информационная связь между объектом и другими объектами множества отсутствует.

2 На основании модели поведения объект выбирает такое свое действие, которое при фиксированных действиях других объектов подмножества направлено на достижение целевой ситуации и дает экстремальное приращение функционалу Y .

3 После выполнения действий объект сравнивает ожидаемую согласно модели поведения ситуацию в среде с реальной ситуацией и на основании разницы между ними осуществляет коррекцию модели поведения.

Отличается следующими преимуществами:

- малое время принятия решения задачи группового управления;
- максимальная живучесть.

Имеет следующие недостатки:

- низкое качество решения;
- длительное время адаптации к изменениям, происходящим в группе.

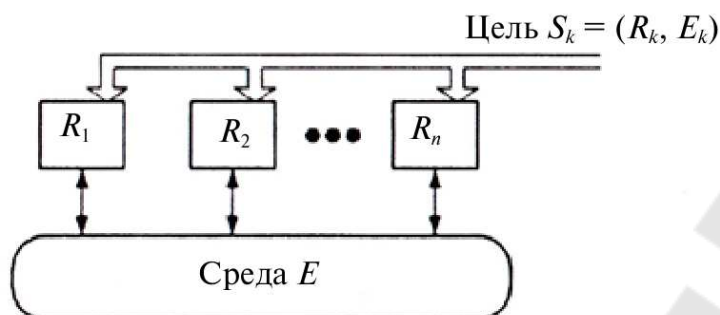


Рисунок 4.6 – Децентрализованная стайная стратегия группового управления

Качественное сравнение различных стратегий группового управления лучше всего осуществлять с точки зрения минимизации времени группового решения задачи, а также живучести распределенной системы и качества решения задачи.

Результаты сравнительного анализа различных стратегий группового управления приведены на рисунок 4.7.

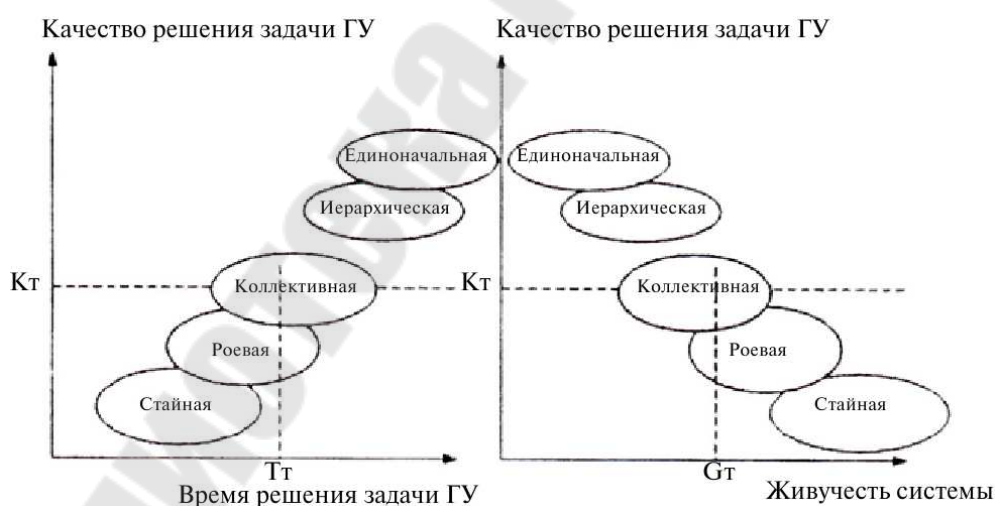


Рисунок 4.7 – Сравнительные характеристики различных стратегий группового управления

Проблема группового управления роботами возникла практически сразу, как только первые роботы появились на производственных предприятиях. Действительно, применение роботов эффективно только в случае, если их много и они выполняют, по крайней мере, большинство технологических операций. При этом они должны работать согласованно друг с другом и с другим технологическим оборудованием.

Простейший случай группового управления в робототехнике – это управление системой приводов одного манипулятора в целях обеспечения заданных перемещений его рабочего органа. Первоначально для этого использовалось централизованное, разомкнутое управление приводами. С ростом требований к точности изменения положений рабочего органа чаще всего используется централизованное управление непосредственно по его координатам, т. е. манипулятор оснащается соответствующими датчиками. Управляющие воздействия на отдельные приводы рассчитываются в этом случае путем решения обратной задачи кинематики или динамики в зависимости от требуемого быстродействия манипулятора. В результате происходит переход к управлению «с ведущим», где роль последнего играет рабочий орган манипулятора (захват, звено с закрепленным инструментом и т. п.).

С развитием адаптивного и интеллектуального управления роботами все более четко просматривается тенденция децентрализации за счет распределения между отдельными подсистемами робота или отдельными роботами группы задач обработки сенсорной информации, формирования моделей среды, базы знаний, т. е. тенденция применения методов распределенных вычислений и распределенного управления [4–8].

Следующая по сложности задача группового управления роботами – это координация их движения в пространстве. Простейший пример – предотвращение столкновений манипуляторов или мобильных роботов. Предельный случай – это работа манипуляторов на общем рабочем месте, например, в составе сборочного центра. В этом случае помимо обеспечения рабочих движений роботов система группового управления должна обеспечивать их безопасность, заключающуюся в исключении столкновений.

Более сложная задача группового управления – обеспечение совместной работы нескольких манипуляторов с координацией их движений одновременно и в пространстве, и во времени, т. е. координа-

ция производственных траекторий движения манипуляторов в реальном масштабе времени. Примером может быть операция сборки различных узлов путем механического соединения деталей, одновременно перемещаемых несколькими манипуляторами.

Далее по сложности следует задача группового управления гибкими производственными системами, где промышленные роботы функционируют совместно с различным технологическим оборудованием, транспортной и складской системами. Общая тенденция развития систем управления такими комплексами заключается в прогрессивном ослаблении централизованного начала и переходе к распределенным гибким производственным системам, состоящим из объединенных локальной сетью технологических модулей и функциональных модулей, выполняющих общесистемные функции. В таких системах может отсутствовать единое планирование и диспетчеризация, а последовательность изготовления каждого очередного изделия определяется в процессе выполнения технологических операций исходя из текущей ситуации.

Наиболее сложная задача группового управления – управление группой роботов в естественной неорганизованной среде (на поверхности Земли или других планет, в воде, воздухе, космосе) и особенно в условиях организованного противодействия со стороны объектов среды или других групп роботов (борьба двух или более групп).

Достижение цели, стоящей перед группой, осуществляется путем выполнения роботами некоторых действий. Для наиболее эффективного, оптимального достижения цели действия отдельных роботов группы, очевидно, должны быть согласованы, т. е. определенным образом скоординированы.

ТЕМА 5 МЕХАТРОННЫЕ МАШИНЫ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Микроэлектромеханические машины и системы (MEMS). Создание MEMS – это сложная комплексная задача, которую не удастся свести просто к уменьшению массогабаритных показателей. При создании микросистем и микроустройств для манипуляций, перемещений или выполнения каких-либо действий в микрометровом диапазоне приходится сталкиваться с рядом особенностей поведения микросистем: снижение влияния гравитационных и инерциальных сил по сравнению с силами сцепления (электростатическими, Ван-дер-

Ваальса и поверхностного натяжения), которые пропорциональны площади поверхности; наибольшая надежность выполнения операций захвата и элементарных операций по перемещению обеспечивается устройствами, основанными на использовании механических, гидравлических, электростатических и электромагнитных сил; повышенные требования к точности изготовления компонентов микросистем порядка 1 мкм. Эти особенности необходимо учитывать при разработке исполнительных механизмов (приводов) для различного рода микросистем. Обычно конструирование приводов сводится к выбору физического эффекта, выходом которого является механическая энергия. С точки зрения габаритов, точности и массы наибольший интерес представляют следующие типы приводов: пьезоэлектрические, магнитострикционные, биметаллические и приводы на базе металлов с памятью.

5.1 Роботы и их классификация. Из всего широкого класса MEMS в качестве примеров рассмотрим микророботы. Роботы, в соответствии с табл. 1, делятся на шесть обобщенных групп: микророботы (рис. 17), мини-роботы (рис. 18), сверхлегкие роботы, легкие, средние и тяжелые.

Таблица 5.1 – Обобщенная классификация роботов по массе

Обобщенная группа (класс)	Наименование по весу	Наименование по размерам	Характеристики квалификационных параметров	
			Весовой диапазон	Размеры
Микророботы			Менее 1 кг	Характерные размеры: десятки мм. Максимальный габарит условно не более 200 мм
Мини-роботы	Сверхлегкие мини-роботы	Мини-роботы	1—7 кг	Характерные размеры: сотни мм. Максимальный габарит условно не более 400 мм
	Носимые мини-роботы		7—15 кг	Характерные размеры: сотни мм. Максимальный габарит условно не более 700 мм
Сверхлегкие		Малогабаритные	15—35 кг	Максимальный габарит условно не более 1000 мм
Легкие		Малоразмерные и андроиды	35—150 кг	Сравнимы с размерами человека
Средние			150—800 кг	
Тяжелые		Средние	Более 800 кг	Сравнимы с размерами легкового автомобиля
		Крупные		Сравнимы с гусеничными и колесными машинами общего назначения



Рисунок 5.1 – Примеры микророботов



Рисунок 5.2 – Примеры минироботов



Рисунок 5.3 – Классификация микророботов

Классификация микророботов по области применения, способам перемещения и т. д. приведена на рисунок 5.3. К технологическим микророботам относятся конструкции, предназначенные для автоматизации технологических процессов производства микромеханических систем, в основном это сборочные процессы и процессы механической обработки отдельных компонентов. Чаще всего стационарные роботы представляют собой копирующие манипуляторы, но работающие в диапазоне микроперемещений и с усилиями, измеряемыми несколькими мН и меньше. Мобильные технологические роботы оснащаются осязательными микросхватами и выполняют задачи транспортировки микрообъектов или микроузлов как в зону сборки, так и готовых изделий на выгрузку. Мобильность реализуется исполь-

зованием колесного, гусеничного или шагающего принципов перемещения.

Инспекционные стационарные микророботы предназначены для проведения операций контроля размеров или других параметров, тестирования функциональных возможностей микросистем, автоматизации операций при работе с электронным микроскопом. Мобильные роботы этого класса чаще всего называют роботами-разведчиками. Основная их задача – инспекция труднодоступных мест, неразрушающий контроль, сбор данных и т. д. Миниатюризация позволяет создавать и использовать при изготовлении таких микророботов СТЗ, приемо-передатчики радиодиапазона, блоки питания и другие компоненты, конструктивно оформленные в виде отдельных микросхем, размеры которых не превышают 1 см^2 . Таким образом, возможно создание инспекционного микроробота, способного автономно перемещаться в течение нескольких десятков часов, передавая при этом на удалении до нескольких сот метров видеоинформацию, данные с регистрирующих приборов и т. д.

К исследовательским роботам следует отнести те микророботы, которые предназначены для отработки новых элементов конструкции, проверки новых узлов связи, управления и т. д. На базе таких роботов часто проводят эксперименты по проверке работоспособности систем управления и планирования, ставят эксперименты по групповому управлению, изучают механизмы взаимодействия с окружающей средой.

Микротехнологические модули и комплексы. Современные микротехнологические модули и комплексы должны отвечать следующим требованиям:

- допустимая погрешность формы при обработке микроизделий – $0,01 \dots 0,1\text{ мкм}$;
- шероховатость обрабатываемой поверхности $Ra = 0,002 \dots 0,01\text{ мкм}$;
- дискретность перемещения при выполнении микросборочных операций до 5 нм ;
- исключение тепловых и вибрационных воздействий на микротехнологические модули.

Примером могут служить электроэрозионные станки фирмы Sodick, которые применяются при обработке деталей в микрооптике и микроэлектронике. Этим требованиям также удовлетворяют стационарные и мобильные робототехнологические модули и комплексы,

участвующие в реализации технологических процессов обработки и сборки микроизделий.

Использование мобильных микророботов в составе микросборочных и микротехнологических станций позволит реализовать многооперационную обработку и сборку, транспортировку объекта, тестирование и контроль конечного продукта, рационально распределить нагрузку между сборочными единицами, повысить эффективность всего комплекса.

При проектировании микророботов необходим конструктивно новый подход к выбору базовых физических эффектов, на основе которых строятся приводы перемещения мобильных роботов. Основное требование к исполнительным механизмам, применяемым в микроробототехнике, – это отсутствие механических передач или преобразователей видов движения. Перемещения, которые должны реализовываться этими приводами, более чем на порядок ниже величины люфта механических передач, поэтому в качестве приводов чаще используются так называемые преобразователи рода энергии, наиболее распространенными из которых являются обращенные электромеханические преобразователи.

Микросистемы находят применение в медицине, биологии, промышленности. Однако при сборке микросистем возникают проблемы, связанные с размерами микрообъектов. В настоящее время недостаточно развиты технические устройства, позволяющие осуществлять с высокой точностью манипуляции над микрообъектами, размеры которых могут быть соизмеримы с размерами молекул. Для такого рода устройств не могут быть применены методы и механизмы реализации сборки, разработанные для систем обычных размеров.

Рассмотрим более подробно конструкцию мобильного пьезоэлектрического микроробота (рисунок 5.4).

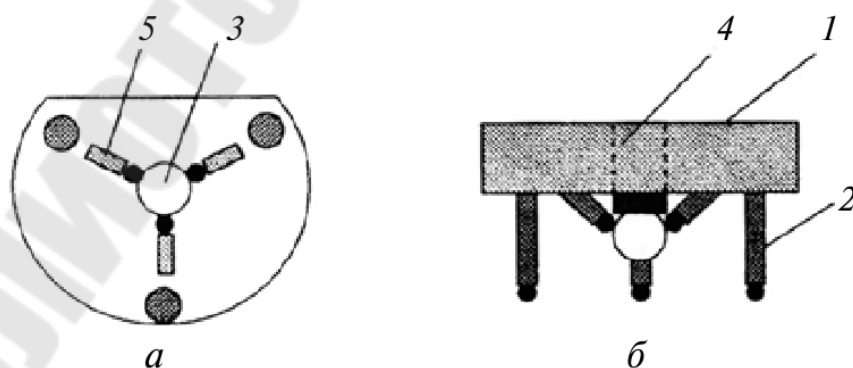


Рисунок 5.4 – Мобильный пьезоэлектрический микроробот:
а – вид снизу; б – вид сбоку

Микроробот содержит подвижную платформу 1. Для реализации его перемещения по плоскости используются три пьезоэлектрических преобразователя 2, расположенных в вершинах равностороннего треугольника. Пьезоэлектрические преобразователи 2 представляют собой пьезокерамический трубчатый элемент с внутренним и четырьмя внешними симметрично расположенными электродами. К свободному концу пьезопривода приклеен рубиновый шарик для обеспечения постоянной величины площади контакта привода с поверхностью.

Под действием электрического напряжения, приложенного между внутренним и одним из внешних электродов, пьезокерамический трубчатый элемент деформируется. При подаче на сегменты внешних электродов соответствующих напряжений пьезопривод 2 можно удлинить, укоротить или согнуть в любом из направлений, что позволяет реализовывать требуемые движения и повороты подвижной платформы 1 микроробота.

Для перемещения платформы используется шагоподобное движение, основанное на скоростных свойствах пьезоэлементов и инерции платформы, которые обеспечивают возможность направленного движения пьезоэлектрического преобразователя при выполнении одного шага, прежде чем под действием силы тяжести платформа потеряет свое устойчивое состояние. Для выполнения одного шага используется определенная последовательность управляющих пилообразных напряжений. Величина шага задается амплитудой подаваемого напряжения, скорость движения – частотой пилообразного напряжения.

Для выполнения манипуляций с микрообъектами микроробот снабжен системой микроманипулирования, которая представляет собой шаровую основу 3 из магнитопроводящего материала с приспособлением для крепления микросхвата. На подвижной платформе 1 установлена магнитная система, состоящая из постоянного магнита 4, компенсирующего силу тяжести и обеспечивающего постоянную силу прижатия шаровой основы 3 манипулятора к пьезоэлектрическим преобразователям 5. Движение манипулятора генерируется с помощью трех пьезоэлектрических преобразователей 5 (идентичных преобразователям 2), оси которых пересекаются в центре шаровой основы под углом 90° друг к другу, то есть образуют декартову систему координат с началом отсчета, расположенным в центре шаровой основы. Прикладывая напряжение на соответствующие противолежа-

щие сегменты внешних электродов двух пьезопроводов 5, можно добиться поворота шаровой основы относительно оси третьего пьезопровода.

В связи с тем что величина одного шага пьезоэлектрического преобразователя меньше диаметра шаровой основы манипулятора более чем на шесть порядков, то управление перемещением микросхвата осуществляется аналогично управлению пьезопроводами 2 подвижной платформы. При этом используются три типа движения манипулятора: во-первых, подъем и опускание манипулятора; во-вторых, движение манипулятора влево и вправо и, в-третьих, вращение манипулятора вокруг собственной оси. Последнее движение может быть выполнено с помощью поворота шаровой основы вокруг одного из пьезопроводов. Первые два типа требуют более сложного составного движения, которое генерируется с помощью чередующихся последовательностей простейших движений – вращения вокруг соответствующих пьезопроводов.

5.2 Кинематические структуры многокоординатных роботов манипуляторов, гексаподы. Типичными представителями многокоординатных (многозвенных) механизмов являются манипуляторы – механизмы, обладающие несколькими степенями подвижности (свободы), которые предназначены для перемещения и ориентации объектов в рабочем пространстве. Манипулятор (рисунок 5.5) является базовым элементом робота.

Кинематика SCARA подобна схемам в угловой системе координат, однако вращающиеся соединения звеньев расположены в горизонтальной, а не в вертикальной плоскости с использованием вертикальной оси для подъема захватного устройства. В такой конструкции сочетаются свойства схем в угловой и цилиндрической системах координат. За счет жесткости конструкции в вертикальном направлении манипуляторы SCARA могут нести повышенные нагрузки на рабочем органе. Высокая точность позиционирования рабочего органа и большая рабочая зона позволяют особенно эффективно применять компоновку SCARA при сборке.

Приведенные манипуляторы обеспечивают промышленным роботам высокую степень манипуляции, но имеют и ряд недостатков:

- низкий показатель грузоподъемность / масса манипулятора;
- относительно низкая точность позиционирования в связи с суммированием погрешностей по всей цепи звеньев манипулятора;

– относительно низкая жесткость манипуляторов.

Один из новых и эффективных методов преодоления перечисленных недостатков – создание машин с параллельной кинематикой (МПК). В основе их конструктивной схемы лежит обычно подвижная «платформа Стюарта», соединенная с основанием несколькими стержнями управляемой длины. Для обеспечения шести степеней свободы платформы необходимо соответственно шесть стержней. Такие машины называются «гексаподы» (от греч. hex – шесть). Если управляемых стержней три, то МПК называется «трипод».

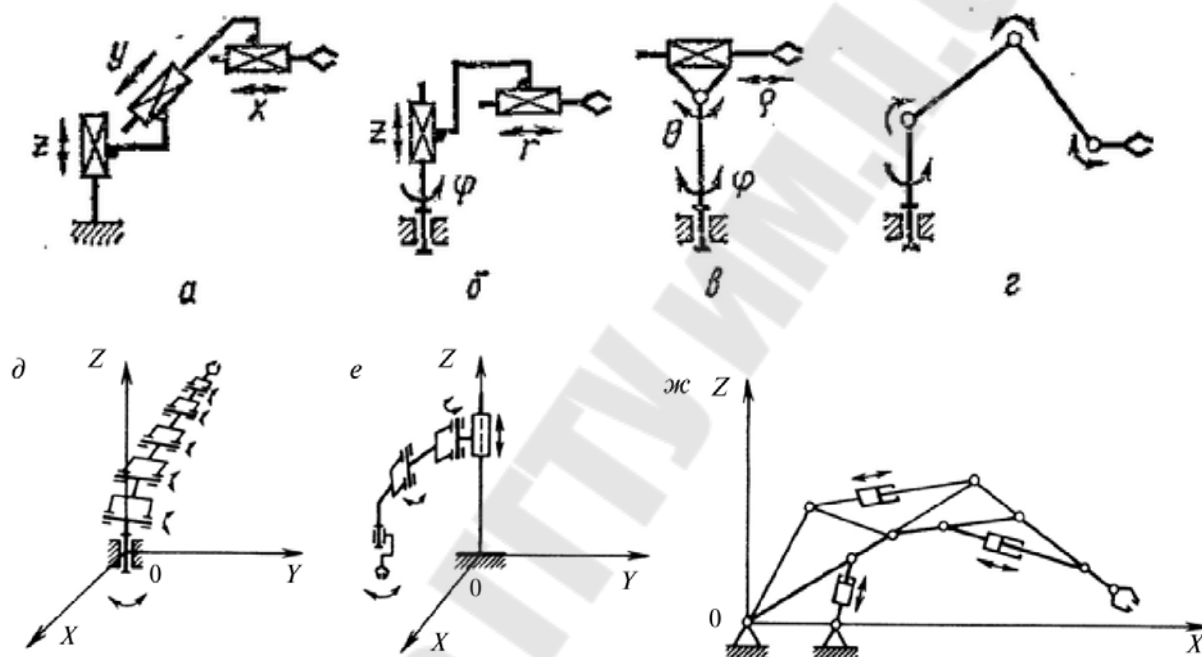


Рисунок 5.5 – Типовые кинематические схемы манипуляторов: *а* – прямоугольная; *б* – цилиндрическая; *в* – сферическая; *г* – сферическая угловая (ангулярная или антропоморфная); *д* – с избыточностью; *е* – SCARA; *ж* – схема гидравлического манипулятора с ветвлением кинематической сети.

Нормальное функционирование гексаподов возможно при следующих условиях:

- по крайней мере, три стержня не должны быть параллельны между собой;
- все стержни должны быть расположены не менее чем в трех непараллельных (и несовпадающих) плоскостях.

Эти условия определены недопустимостью так называемых «особых положений», при которых дальнейшее движение либо неопределенно, либо невозможно. В действительности не следует даже

приближаться к такому положению. В то же время при определенных условиях особое положение можно пройти по инерции, подобно прохождению «мертвой точки» в кривошипно-ползунном механизме.

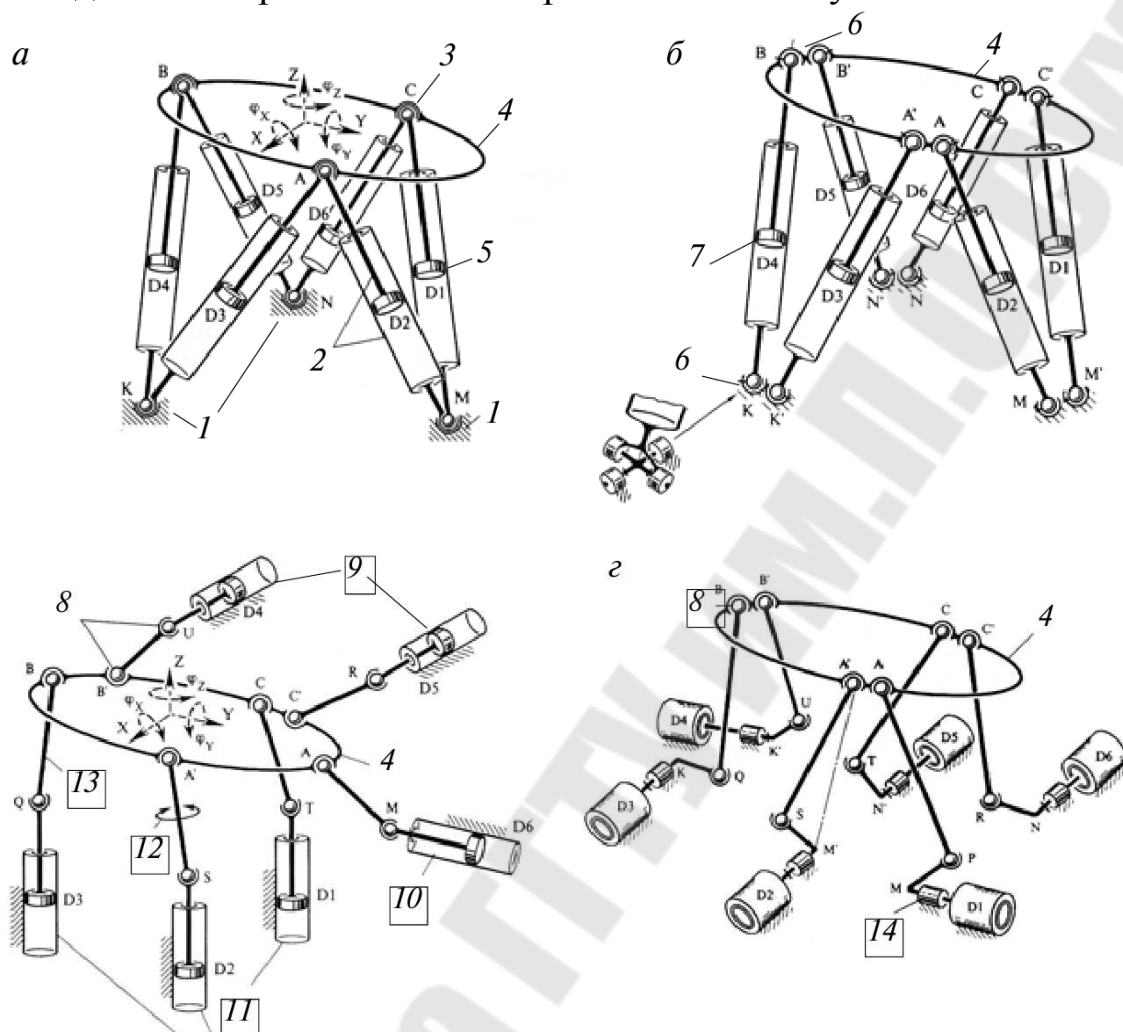


Рисунок 5.6 –. Варианты кинематических схем гексаподов
 1 – основание; 2 – свободные вращения – самоустановка штоков и цилиндров; 3 – двойной сферический шарнир (IIIs+IIIs) или (IVs+IVs) или (IIIs+IVs) с общим центром; 4 – выходное звено (платформа/стол); 5 – одноподвижная (поступательная, винтовая) или двухподвижная (поступательно-вращательная) пара; 6 – двухподвижный сферический цилиндр (карданное соединение) IVs; 7 – поступательная пара с возможностью вращения (IVs); 8 – сферические трехподвижные шарниры (IIIs); 9 – приводы для воспроизведения перемещений в основном вдоль оси X и поворота ϕ_Z ; 10 – привод для воспроизведения перемещений в основном вдоль оси Y; 11 – приводы для воспроизведения перемещений в основном вдоль оси Z и поворотов ϕ_X и ϕ_Y ; 12 – свободное вращение (самоустановка шатуна); 13 – шатун; 14 – одноподвижная вращательная пара (Vr)

Рассмотренные технические решения мехатронных технологических систем на базе механизмов параллельной кинематики обеспечивают существенные преимущества по сравнению со станками традиционной компоновки по технологическим возможностям обработки изделий сложной конфигурации и точности исполнительных движений.

Наиболее перспективной областью их применения является прецизионное станкостроение. Результаты структурного анализа систем параллельной кинематики могут быть использованы при проектировании нового типа автоматизированных технологических систем.

Основные преимущества гексаподных машин:

- сокращение времени подготовки производства и повышение его рентабельности за счет объединения обрабатывающих, разметочных и измерительных функций в единой мехатронной системе;
- высокая точность измерений и обработки, которая обеспечивается повышенной жесткостью стержневых механизмов (до 5 раз), применением прецизионных датчиков обратной связи и лазерных измерительных систем, использованием компьютерных методов коррекции (например, тепловых воздействий);
- повышенная скорость движений (скорость быстрых перемещений достигает 10 м/с, рабочих движений – до 2,5 м/с);
- отсутствие направляющих (в качестве несущих элементов конструкции используются приводные механизмы), откуда улучшенные массогабаритные характеристики и материалоемкость;
- «высокое качество управления движением благодаря малой инерционности механизмов, применению линейных мехатронных модулей движения как объектов управления, использованию методов автоматизированной подготовки и исполнения в реальном времени управляющих программ, наличию дружелюбного интерфейса «человек – машина». Гексаподы могут быть как вертикальные, так и горизонтальные. Механизмы с параллельной кинематикой (МПК) не обязательно должны иметь шесть штанг. Их может быть и три и восемь. Важно, что пространственные движения платформы передают путем изменения длин штанг. В отличие от традиционных последовательных многокоординатных систем, в которых погрешности позиционирования по каждой из осей суммируются, погрешности МПК могут взаимно компенсироваться, так что общая неточность может достигать доли микрона.

Одно из наиболее интересных исполнений МПК предусматривает закрепление рабочего инструмента на подвижной платформе. В другом варианте подвижная платформа является рабочим столом станка.

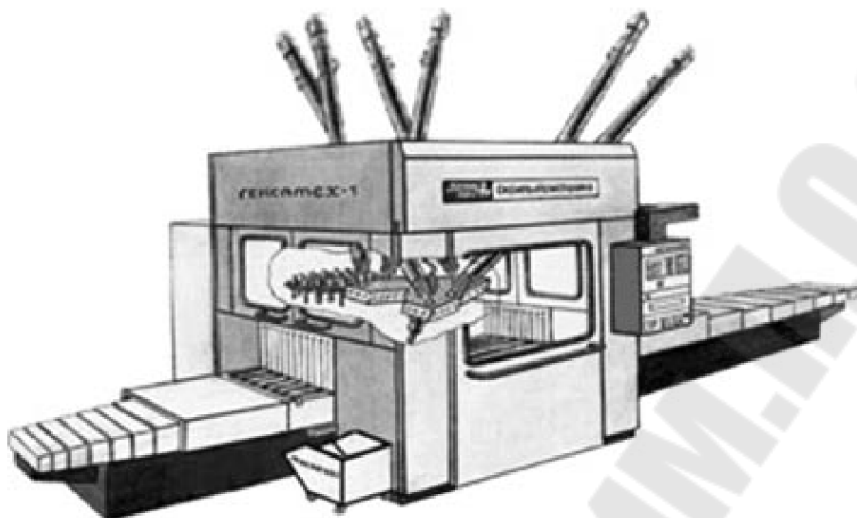


Рисунок 5.7 – Общий вид гексапода модели ГЕКСАМЕХ-1

Необходимо заметить, что все МПК построены на мехатронных принципах: они являются гибридными машинами со встроенными интеллектуальными системами управления – наиболее сложный вариант мехатронной системы. В 2003 году в России был создан первый серийный станок типа МПК – Гексамех-1 (НИИАТ-САВМА) (рисунок 5.7). Станок предназначен для обработки изделий сложной пространственной формы в авиакосмической, автомобильной, судостроительной промышленности. Типовые обрабатываемые изделия: балки, нервюры, лонжероны, панели, литейные и мастер-модели, оснастка.

Станок представляет собой гексапод с подвешенным на шести штангах электрошпинделем и продольно подвижным столом. Он имеет высокоскоростной (до 24 000 мин⁻¹) электрошпиндель, который позволяет выполнять обработку деталей с повышенной производительностью и высоким классом чистоты поверхности. Точность позиционирования – $\pm 0,05$ мм. Цифровые приводы подачи фирмы

INDRAMAT с интерфейсом SERCOS и мультипроцессорная система управления POWER AUTOMATION обеспечивают высокую динамику и надежность управления гексаподом. Технические характеристики перемещения по координатам: по X – 3000 мм, по Y – 800 мм,

по Z – 700 мм; A – $\pm 30^\circ$, $B \approx \pm 25^\circ$. Скорости подач – до 30 м/мин, ускорения – до 10 м/с².

На базе созданного образца гексапода предполагается разработка серии обрабатывающих центров с перемещением по координате X , т. е. стола, до 30 м.

К числу наиболее важных конструктивных элементов можно отнести штанги с встроенным электродвигателем, шарниры, а также электрошпиндели. Пока конструктивное исполнение с линейными электродвигателями фирмы разработчики не раскрывают.

Наряду с очевидными преимуществами опыт внедрения машин с параллельной и гибридной кинематикой в реальное производство выявил ряд актуальных научно-технических проблем. К ним можно отнести следующие вопросы:

- сложность системной интеграции, необходимость дополнительного времени для анализа и поиска неисправностей;
- большая трудоемкость обслуживания и программирования машины по сравнению с традиционным оборудованием;
- сложность и неотработанность процедуры калибровки машины;
- необходимость знаний как в области станков с ЧПУ, так и промышленных роботов для обучения персонала методике программирования;
- неоднородность (анизотропия) характеристик машины в различных областях рабочей зоны, наличие особых конфигураций.

На эффективность решения этих задач, поставленных практикой производственного применения, необходимо обратить особое внимание при создании машин нового поколения.

5.3 Многофункциональные обрабатывающие центры. В настоящее время машиностроительные фирмы заняты разработкой многофункциональных металлообрабатывающих центров. К числу таких фирм можно отнести: OKUMA OKAMOTO (Япония), Niles-Simmons Hegenscheidt, MIKROMAT, DMG ECOLINE (Германия) и др.

Большинство современных обрабатывающих центров различного назначения (многофункциональные, вертикальные, горизонтальные, токарные, порталные и др.) оборудованы высокоскоростными шпиндель-двигателями (мотор-шпинделями) с частотой вращения до 18000 мин⁻¹, встроенными системами измерения и сканирования инструмента и точностью позиционирования осей обработки, системами управления скоростью резания без увеличения уровня вибрации (про-

грамма Machining Navi (Япония)), системами компенсации температурных изменений (увеличение температуры прогнозируется и при необходимости компенсируется – фирма OKUMA), системами предупреждения столкновениями для автоматического и ручного режимов работы станков (Collision Avoidance System – OKUMA), современными системами ЧПУ (PCNC) (например, OSP – Okuma Sampling Path Control).

5.4 Роботизированные технологические комплексы холодной штамповки. Широкое применение ПР получили на холодной штамповке из-за большого травматизма рабочих и монотонности обслуживания ими прессов. Роботы в этом случае выполняют загрузку прессов исходным листовым материалом и съем готовой штамповки из штампа с укладкой ее в операционный накопитель готовых деталей. На рисунке 5.8 показан один из многих вариантов компоновки РТК холодной штамповки. Основная особенность применения ПР на холодной штамповке – обеспечение значительного быстродействия, так как цикл работы пресса составляет несколько секунд. Для обеспечения необходимой быстроты обслуживания пресса часто применяют двурукие манипуляторы – одна для загрузки, а другая для разгрузки штампа.

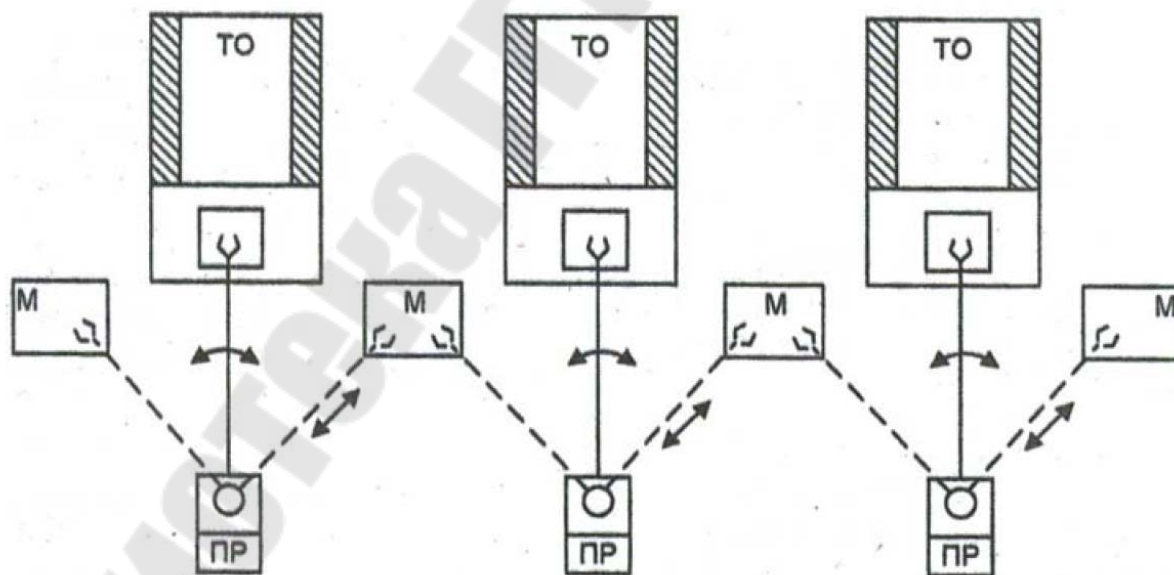


Рисунок 5.8 – Схема однопоточной роботизированной технологической линии холодной штамповки с линейной компоновкой: ТО – основное технологическое оборудование; ПР – промышленный робот; М – магазин поштучной выдачи заготовок.

5.5 Роботы для бытового применения, для досуга и развлечений, военного назначения.

Бытовые роботы – роботы, предназначенные для помощи человеку в повседневной жизни. Выделяем следующие классы:

1 Транспортные роботы – используются для перевозки пассажиров и грузов в автоматическом режиме.

2 Умный дом — интеллектуальная, роботизированная система, главной задачей которой является автоматизация и согласование всех систем жизнеобеспечения и безопасности.

3 Робот-помощник – универсальный класс роботов способных на физическую и интеллектуальную помощь хозяину.

4 Робот-домохозяйка – класс роботов выполняющих повседневную работу в доме, к нему относятся роботы-повара, пылесосы, мойщики окон, посудомойки, очистители воздуха, автокормушки, уборщики бассейнов и др.

Социальные роботы – роботы, способные в автономном или полуавтономном режиме взаимодействовать и общаться с людьми в общественных местах или домах.

1 Роботы члены семьи – устройства, способные практически полностью «влиться» в состав семьи, способны передвигаться по дому, взаимодействовать с окружающими.

2 Роботы-животные – устройства, заменяющие домашних животных, способны копировать их движения и звуки.

3 Роботы-игрушки – средства развлечения детей, способствующие их обучению различным навыкам и знаниям.

Медицинские роботы – роботы, созданные для выполнения медицинских манипуляций под управлением человека.

1 Роботы-хирурги – применяются для хирургического лечения заболеваний и травм, кроме выполнения роли хирурга, могут выполнять функции ассистента при операциях.

2 Роботы-фармацевты – способны изготавливать и раздавать лечебные препараты пациентам.

3 Роботизированные протезы – предназначены для замены утраченных или необратимо повреждённых частей тела искусственными роботизированными устройствами.

4 Роботизированные трансплантаты – используются для замены поврежденных или не функционирующих органов и тканей на роботизированные устройства, способными действительно их заменить.

5 *Роботы-сиделки* – способны заменить работников младшего медицинского персонала при уходе за больными.

6 *Роботизированные симуляторы пациентов* – предназначены для практического обучения и отработки навыков медицинских специалистов.

7 *Роботы-диагносты* – способны на основе данных анамнеза поставить диагноз и назначить лечение.

Исследовательские роботы – это устройства для проведения различных исследований, в том числе и возможностей использования роботов для выполнения различных функций. К ним относятся многочисленные приборы как автоматического, так и полуавтоматического плана. По средам использования различают:

1 *Космические* – используются для проведения исследований в условиях космоса, к ним можно отнести различные исследовательские спутники.

2 *Наземные* – предназначены для проведения исследований на поверхности земли, в случае проведения исследований на других планетах, роботов называют планетоходами.

3 *Подземные* – способны проводить исследования под поверхностью почвы, или непосредственно под грунтом или же в пещерах и гротах.

4 *Морские* – устройства для проведения исследований в надводном или подводном положении.

Боевые роботы – это многофункциональные технические устройства с антропоморфным (человекоподобным) поведением, частично или полностью выполняющие функции человека при решении определенных боевых задач. Позволяет заменить человека при выполнении боевых задач, сохранить ему жизнь, а также выполнить задачи, несовместимые с его возможностями.

По средам использования различают:

1 *Воздушные БПЛА (Беспилотный летательный аппарат)* – предназначены для выполнения воздушных миссий, таких как наблюдение и разведка, координация нанесения ударов по противнику, создание рядом с собой беспроводных сетей связи.

2 *Сухопутные* – к этому классу относятся наземные боевые машины, это беспилотные военные автомобили, системы разведки, охраняемые системы, роботы-сапёры, а также полноценные боевые комплексы.

3 *Морские* – этот класс объединяет роботизированные устройства надводного и подводного типа, основными задачами которых является разведка, сопровождение, патрулирование и поиск мин.

ТЕМА 6 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМЫ

Интеллектуализация мехатронных и робототехнических систем подразумевает построение технических систем, способных выполнять функции, которые, если бы их выполнял человек, считались бы интеллектуальными, т. е. требовали бы от человека его естественного интеллекта. Интеллект технических систем принято называть «искусственный интеллект». В последние годы все более четко прорисовываются области конкретного применения и реальные возможности интеллектуальных технологий – это, прежде всего, сложные (мехатронные) объекты и большие физико-технические и организационные системы, для которых доступно описание только на вербальном (или семиотическом) уровне.

Для таких объектов и систем характерны следующие признаки:

- сложность формального описания объекта и задач управления с учетом погрешностей необходимых вычислений и измерений;
- нечеткость целей функционирования и задач управления;
- нестационарность параметров объекта и условий функционирования;
- невоспроизводимость поведения объектов и систем при повторных испытаниях;
- наличие случайных воздействий внешней среды;
- искажение поступающей входной информации в каналах дистанционной передачи данных.

Поэтому интеллектуализация сложных (мехатронных) систем осуществляется путем использования широкого класса физических эффектов для разработки встроенных сенсорных, измерительно-информационных систем и приводов различной физической природы, а также создания интеллектуального человеко-машинного интерфейса. Однако основным направлением интеллектуализации является создание интеллектуальных систем управления, априорно способных функционировать в условиях неполноты и нечеткости исходной информации, неопределенности внешних возмущений и среды функционирования за счет работы со специальными знаниями в той или иной предметной области. Для решения неформальных задач интел-

лектуального управления целесообразно и необходимо привлекать методы и технологии искусственного интеллекта.

Общую проблематику и прикладные задачи теории искусственного интеллекта представим в виде блок-схемы (рисунок 6.1).



Рисунок 6.1 – Общая проблематика теории искусственного интеллекта

Предложенные формы представления знаний (рисунок 6.1), способы их извлечения и пополнения, варианты организации логического вывода успешно реализуются в широком спектре различных практических приложений – экспертных и диагностических системах, системах планирования и поддержки принятия решений, вопросно-ответных и обучающих системах, средствах аннотирования и перевода естественно-языковых текстов, шахматных программах и ряде других.

Интеллектуальные системы управления мехатронными системами базируются на двух основных идеях: управление на основе анализа внешних ситуаций (ситуационное управление) и использование современных информационных технологий обработки знаний. Существует, по крайней мере, пять различных информационных техноло-

гий: экспертные системы, нечеткая логика, нейронные структуры, эволюционные (генетические) алгоритмы и ассоциативная память.

Суть метода ситуационного управления состоит в том, что каждому классу ситуаций, возникновение которых считается допустимым в процессе функционирования системы, ставится в соответствие некоторое решение по управлению (управляющее воздействие, программно-алгоритмическая управляющая процедура и т. д.). При этом сложившаяся ситуация, определяемая текущим состоянием, как самого объекта, так и его внешней среды и идентифицируемая с помощью измерительно-информационных средств, может быть отнесена к некоторому классу, для которого требуемое управление уже является известным (рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 – Реализация принципов ситуационного управления

Главная архитектурная особенность, которая отличает интеллектуальную систему управления (рисунок 6.3) от построенной по «традиционной» схеме, связана с подключением механизмов хранения и обработки знаний для реализации способностей по выполнению требуемых функций в неполнозаданных (или неопределенных) условиях при случайном характере внешних возмущений.

К возмущениям подобного рода могут относиться непредусмотренное изменение целей, эксплуатационных характеристик системы и объекта управления, параметров внешней среды и т. д. Кроме того, состав системы при необходимости дополняется средствами самообучения, обеспечивающими обобщение накапливаемого опыта, и на этой основе – пополнение знаний.



Рисунок 6.3 – Обобщенная структура интеллектуальной системы управления

В общем случае объект управления может иметь достаточно сложную конструкцию, включающую в свой состав ряд функциональноподчиненных подсистем. Иерархия их подчинения обуславливает декомпозицию исходных целей и задач управления на рекурсивную последовательность вложенных составляющих. В конечном итоге такое разделение предполагает многоуровневую организацию сис-

темы управления, обладающей развитыми интеллектуальными возможностями по анализу и распознаванию обстановки, формированию стратегии целесообразного поведения, планированию последовательности действий, а также синтезу исполнительных законов, удовлетворяющих заданным показателям качества. Структура интеллектуальной системы управления сложным динамическим объектом (рисунок 6.4) должна соответствовать иерархическому принципу построения и включать стратегический, тактический и исполнительный (приводной) уровни, а также комплекс необходимых измерительно-информационных средств.



Рисунок 6.4 – Иерархическое построение системы интеллектуального управления сложным динамическим объектом

Корректность замыкания отдельных контуров иерархии управления определяется тем составом функциональных элементов, которые обеспечивают требуемую адекватность информационной под-

держки в процессе сбора и обобщения сенсорных данных о текущем состоянии и воздействиях внешнего мира. Таким образом, организация каждого уровня интеллектуального управления предполагает использование уникальной совокупности собственных моделей представления знаний, информационной поддержки, описания контролируемого объекта и т. д.

Принцип иерархического построения систем управления сложными динамическими объектами известен с конца 70-х начала 80-х гг., подобная идея неоднократно обсуждалась применительно к проблемам управления многофункциональными роботами вообще и обладающими «элементами искусственного интеллекта» в частности. По представлениям того времени интеллектуальные функции ограничивались задачами «восприятия, распознавания и моделирования обстановки», а в последующем «принятием решения на выполнение той или иной операции», концентрировались исключительно на «высшем» уровне иерархии, венчающем исполнительную, тактическую и стратегическую ступени управления.

С учетом последних достижений в области искусственного интеллекта и смежных научных направлений сферу прикладного применения методов и технологий обработки знаний в решении задач управления можно и нужно подвергнуть существенному пересмотру. Его основная суть заключается в кардинальном изменении точки зрения на роль и место современных интеллектуальных технологий в организации иерархического управления сложными динамическими объектами.

Главным отличием новой концепции иерархического построения систем управления сложными динамическими объектами является использование методов и технологий искусственного интеллекта в качестве основных средств борьбы с неопределенностью внешней среды. Необходимость интеллектуализации каждого из уровней управления обусловлена подверженностью выполняемых ими функций влиянию различных факторов неопределенности. Практическое воплощение этой концепции предполагает избирательное использование тех или иных технологий обработки знаний в зависимости от специфики решаемых задач, особенностей управляемого объекта, его функционального назначения, условий эксплуатации и т. д.

6.1 Управление мобильными роботами и робототехническими комплексами. Основное отличие системы управления передви-

жением роботов от управления манипуляторами заключается в неизмеримо большей рабочей зоне и ее неопределенности [3].

Рассмотрим такие особенности применительно к мобильным роботам, передвигающимся по произвольной местности (рисунок 6.5). В данном случае модель внешней среды представляет собой карту местности, которая помимо априорных сведений составляется и уточняется в ходе движения на основе сенсорной информации (радиотехнические, лазерные, ультразвуковые локаторы, системы технического зрения).

Такая модель должна иметь как минимум два уровня по масштабу: первый – в пределах достигаемости сенсорных систем, второй – непосредственно перед роботом.

Модель первого уровня местности служит для прокладки маршрута движения в соответствии с заданной целью. Это задача навигации. Варианты целей:

- поиск конкретных объектов (по заданным признакам);
- достижение определенной точки на местности, заданной координатами;
- движение по заданному маршруту, например, для выполнения определенной технологической операции (инспекция, нанесения покрытия, очистка и т. д.).

Вторая, более подробная модель ближайшего участка местности необходима для уточнения маршрута непосредственно перед роботом с учетом препятствий, не отмеченных на карте местности первого уровня. В целом – это задача обеспечения безопасности движения.

Для гарантированного решения последней задачи может потребоваться специальная система обеспечения безопасности, которая контролирует:

- углы наклона шасси робота, не допуская превышения их критических значений, определяемых условиями опрокидывания;
- опасные вертикальные провалы и трещины непосредственно перед роботом;
- оценивает свойства грунта в отношении его проходимости;
- обеспечивает аварийную остановку робота по сигналу дистанционного или контактного датчика препятствий, возникающих непосредственно перед роботом.

Блок управления движением (БУД) осуществляет управление тяговыми приводами и приводами поворота шасси. Блок планирования движения осуществляет построение траектории движения, опти-

мизируя ее по минимуму расхода энергии, что особенно важно для роботов с автономным энергопитанием, или по минимуму времени выполнения задания, когда в постановку задачи входит условие обеспечения максимального быстродействия.



Рисунок 6.5 – Функциональная схема управления движением по местности мобильного робота: БУД – блок управления движением; П – приводы; МС – механическая система.

Блок построения модели местности представляет ее в форме, удобной для решения задачи синтеза траектории движения с выделением непреодолимых препятствий и опасных или неясных участков.

Если выполнение задачи требует знания большего участка местности, чем дают сенсорные системы в начальном положении робота, т. е. до начала движения, карта местности формируется и передается в блок планирования фрагментами по мере передвижения робота. В этом случае первое приближение для всей траектории делается по имеющейся априорной информации о местности или, как минимум, определяется только общее направление движения.

На нижнем общесистемном уровне системы находится канал управления движением в ближней зоне, включающей в себя наиболее детальную модель этой зоны и реализующий алгоритмы обеспечения безопасности движения.

Требуемый уровень адаптации и искусственного интеллекта системы определяется степенью неопределенности и сложности местности, а также характером подлежащих выполнению заданий. В последнем отношении основное значение имеет минимально необходимая степень автономности управления роботом, определяемая перечнем его действий, которые должны выполняться без участия человека-оператора. При этом учитывается и возможность временной потери связи с оператором, ограниченная пропускная способность каналов связи, неполнота и ограниченная достоверность получаемой оператором от робота информации и ее задержка во времени. Например, если из-за высокого уровня помех в канале передачи оператор не получает изображения панорамы местности перед роботом или только эпизодически получает эту информацию, он имеет возможность вмешиваться в автономное движение робота только для контроля и корректировки маршрута движения путем целеуказания отдельных промежуточных точек трассы в моменты ее достоверного наблюдения.

Одним из способов организации движения робота в заранее не определённой среде может быть использование алгоритмов системы управления движением робота, снабжённого оптронной линейкой – датчиком слежения за полосой, нанесённой на поверхность полигона. Существует метод организации движения робота на оснащённом системой маяков полигоне, основанный на построении виртуальной полосы, которая формируется в бортовом компьютере робота с таким расчётом, чтобы она огибала включённые маяки и обеспечивала прохождение заданной трассы. Автономное определение на борту робота его обобщённых координат позволяет сформировать «виртуальную оптронную линейку», сигнал с которой пропорционален отклонению робота от виртуальной полосы.

Сегодня, большинство роботов, ориентирующихся на местности, полагаются на одометрию (*odometry* – измерение пройденного пути) как на основу навигационной системы. Обычный одометрический измеритель включает в себя оптические кодировщики, спаренные с вращающимися осями. В современной робототехнике используются следующие вращательные сенсоры, измеряющие перемещение и скорость: а) кодеры со щеточными контактами; б) потенциометры; в) оптические кодеры; г) магнитные кодеры; д) индуктивные кодеры; е) емкостные кодеры.

Существует картографическое позиционирование (также известное как «карто соответствующая» или "map matching") – это тех-

нология, по которой робот использует сенсоры для построения локальной карты местности. Эта локальная карта потом сравнивается с глобальной, предварительно сохраненной в памяти. После нахождения совпадений робот вычисляет свое текущее положение и ориентацию на местности. В качестве предварительно записанной карты может выступать САПР модель местности, или она может быть построена по предварительно полученным от сенсоров данным.

Основные преимущества картографического позиционирования:

- а) используется на местности со структурой типичной для помещения и получает информацию о положении в окружении, не изменяя его;
- б) может быть использована для создания и обновления карты местности;
- в) позволяет роботу изучить новую местность и повышает точность позиционирования при ее (местности) исследовании.

Недостатки картографической навигации связаны со следующими требованиями:

- а) на местности должно быть достаточное количество стационарных, хорошо различимых деталей, по которым будет производиться сопоставление, сенсоров должно быть ровно столько, сколько необходимо (в зависимости от поставленной задачи);
- б) должна быть доступна значительная чувствительная и вычислительная мощность.

В картографическом позиционировании выделяют два общих способа представления карт: геометрическое и топологическое. На геометрической карте объекты представляются в соответствии с их абсолютными геометрическими отношениями. Это может быть сеточная карта или более абстрактная линейная или полигональная карта. С другой стороны – топологический подход, он больше базируется на протоколировании геометрических отношений между отслеженными особенностями, чем на их абсолютное положение в координатах относительно некоторой системы отсчета. В отличие от геометрических карт, топологические карты могут строиться и поддерживаться без знания о расположении робота.

ТЕМА 7 ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА МЕХАТРОННЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Создание информационно-сенсорных систем является самостоятельным направлением, имеющим очень широкое применение и в робототехнике и мехатронике. Любой процесс управления предполагает

наличие обратной связи, а ее реализация требует датчиков обратной связи, измеряющих регулируемые параметры (координаты, скорость, температуру, положение и т.д.). В настоящее время наука о технических измерениях входит в новую фазу, связанную с применением сенсорных устройств в мехатронике и робототехнике. Эта фаза состоит в переходе от отдельных датчиков к сложным измерительным системам, которые предполагают сложные способы обработки информации поступающей от этих датчиков. Например, система технического зрения робота. Таким образом, в робототехнике наряду с датчиками состояния системы, характерными для любых систем, появляются датчики состояния внешнего мира (среды).

Обозначим основные термины, связанные с информационными системами. *Первичным преобразователем (чувствительным элементом)* называется простейший элемент информационной системы, изменяющий свое состояние под действие внешнего возмущения, например, фототранзистор, светодиод. Датчик представляет собой устройство, которое под воздействием измеряемой физической величины выдает эквивалентный сигнал обычно электрической природы, заряд, ток, напряжение, являющийся однозначной функцией измеряемой величины. Простейший датчик состоит из одного или нескольких первичных преобразователей и измерительной цепи. Большинство датчиков имеют внешний источник питания, а в качестве нагрузки может быть использован усилитель, измерительный прибор, блок сопряжения с компьютером.

7.1 Виды информационных систем: измерительная, автоматического контроля, технической диагностики, распознавания образов

Сенсорные системы роботов составляют основную часть их информационно-измерительных систем (рисунок 7.1), назначение которых формировать и выдавать информацию о состоянии объектов и процессах в окружающей среде и о самом роботе, для функционирования которого эта информация требуется.

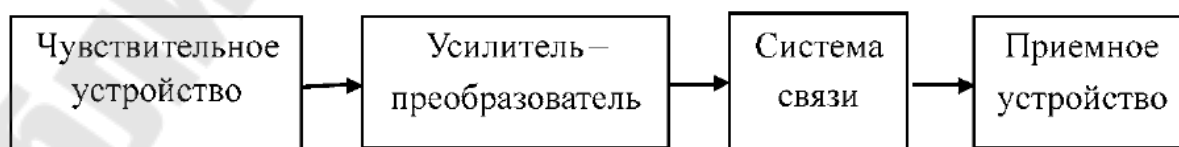


Рисунок 7.1 – Функциональная схема информационно-измерительной системы

Чувствительное устройство или датчик – это первичный преобразователь, который реагирует на подлежащую выявлению величину (температура, давление, перемещение, сила тока и т. д.) и преобразует ее в другую величину, удобную для дальнейшего использования, выдавая сигнал о ее наличии и интенсивности. Этот сигнал может быть любой физической природы, определяемой принципом действия чувствительного устройства. Предпочтительно, чтобы он был электрическим, т. к. подавляющее большинство технических систем, в которых он будет использоваться, – электрические. Однако существуют и системы другой природы, например, полностью пневматические, предназначенные для работы в условиях, не допускающих электричества. В этих случаях приходится использовать сигналы другой природы.

Второе звено усилитель-преобразователь осуществляет усиление первичного сигнала, выдаваемого чувствительным устройством, и преобразование его в наиболее удобную форму для дальнейшего использования. Например, сигнал в виде напряжения постоянного тока часто преобразуется в частоту переменного тока, что резко повышает устойчивость к помехам. Предпочтительнее всего, конечно, преобразование непрерывного сигнала в цифровой с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Последним возможным этапом преобразования исходного сигнала является его измерение, т. е. количественная оценка его величины путем сравнения с некоторым эталоном и выражения этой величины в единицах, определяемых этим эталоном. Это общая для всех информационно-измерительных систем часть унифицирована и стандартизирована. Она состоит из двух приборов: электронного ядра системы (крейта) и интерфейсов, связующих его с датчиками, которых в общем случае может быть несколько.

Следующее звено – система связи присутствует только в информационно-измерительных системах, в которых требуется передавать информацию на такие большие расстояния и в таких условиях, когда для этого требуется специальная система такой передачи с преобразованием исходной информации в вид, необходимый для ее осуществления. Используются все существующие каналы связи – телефонные, радио, оптоволоконные, спутниковые и др. Такие информационно-измерительные системы называются телеизмерительными. Если расстояние от усилителя-преобразователя до приемного устройства невелико – десятки метров, передача информации может осуще-

ствляться без ее преобразования. Такие системы называются дистанционными.

При отсутствии необходимости удаления приемного устройства от остальной части системы она вся конструктивно может выполняться в виде одного прибора. Приемное устройство в зависимости от назначения системы может служить для передачи получаемой информации в какую-нибудь техническую систему управления, контроля и т. д., на пульт человека-оператора с соответствующей визуализацией, просто в запоминающее устройство или для нескольких таких целей.

Представленная функциональная схема информационно-измерительной системы в общем случае, может включать несколько чувствительных устройств (датчиков), поэтому все последующие ее звенья будут многоканальными, а сама выявляемая величина – вектором. Общим случаем таких многоканальных систем являются распределенные системы, в которых датчики пространственно разнесены, в том числе, возможно, и по разным объектам.

В таких многоканальных системах возникают специфические задачи согласования форм представления сигналов от разных датчиков и их синхронизация для возможности совместного использования. С развитием компьютерных сетей они стали широко использоваться в качестве таких многоканальных распределенных систем связи и в целом как сетевые информационные и управляющие системы, в частности в виде мультиагентных систем. Передача информации осуществляется в них по стандартным протоколам.

7.2 Первичные преобразователи. Из компонентов информационно-измерительных систем (рисунок 7.2) оригинальными являются только датчики. Остальные компоненты имеют более широкое применение в различных видах техники и заимствованы из них. Основной характеризующий их признак — это выявляемая величина. Созданы и производятся датчики всех величин, которые используются в современных технических системах: механические величины (перемещение, усилие, скорость, ускорение), электрические (напряжение, ток, частота, фаза, мощность), тепловые, оптические, акустические, магнитные и т. д.

Когда создаются принципиально новые системы, использующие новые переменные величины, создание таких систем начинается с разработки соответствующих новых датчиков. Последние примеры: датчики геометрических наноразмеров, необходимые при создании

нанотехнологий, химические датчики, имитирующие вкусовые и обонятельные органы чувств живых существ, которые потребовались при создании соответствующих новых информационно-измерительных систем.

Вторая важная классификация датчиков выполняется по принципу действия, т. е. по принципу преобразования интересующих нас величин в пригодную для последующего использования. Поэтому признаку различают датчики тензометрические, пьезоэлектрические, емкостные, индуктивные, гальваноманометрические (на эффекте Холла), термопары и др. [1].

Вместе с получением информации об искомой величине непосредственно путем прямого ее преобразования с помощью датчиков, существует способ косвенного определения этих величин путем вычисления по измеряемым значениям других величин, функционально связанных с искомой величиной математической зависимостью. Такие устройства называются наблюдателями. Например, усилие, развиваемое электрическим двигателем, можно вместо датчика момента определять по формуле, выражающей этот момент через входные переменные — напряжение и ток питания. Этот способ особенно важен для величин, которые физически не возможно непосредственно воспринимать. Он используется и в тех случаях, когда имеет преимущество перед датчиками, например, по диапазону выявляемой величины, стоимости, надежности.

Общая стандартная характеристика датчиков — это статическая и динамическая зависимости выход (выход). Статическая характеристика в предельно простом варианте релейная, как например, у датчиков механического касания, задымления и т. п. В общем случае от статической характеристики требуется линейность, описываемая коэффициентом передачи и соответствующим диапазоном входной величины. Минимальные значения воспринимаемой датчиком входной величины определяет его чувствительность. Динамическая зависимость обычно описывается частотными характеристиками для линейного участка статической характеристики и переходными характеристиками, а так же значением чистого временного запаздывания, если оно имеется. Другие показатели, которые могут быть важны для конкретных применений датчиков, — это габариты и масса, энергопотребление, надежность и ресурс, стоимость.

Датчики перемещения существуют линейные и угловые. Они различаются по диапазону (интервалу) перемещения и классу точно-

сти. Например, по отечественному ГОСТ датчики угловых перемещений в диапазоне 360° имеют шесть классов точности от $50''$ для датчиков I класса до $1''$ для VI класса. Для этих датчиков важным показателем является так же погрешность от нелинейности, которая у современных датчиков лежит в пределах от 0,01 до 5 %, и разрешающая способность, которая не более 10 мкм. По принципу действия эти датчики делятся на резистивные, электромагнитные, фотоэлектрические и емкостные.

Резистивные (потенциометрические) датчики перемещения представляют собой потенциометр с движком, перемещение которого и является первичной выявляемой величиной, которая преобразуется в сопротивление. Величина последнего преобразуется затем в выходное напряжение постоянного или переменного тока в схеме делителя напряжения и с помощью мостовой схемы. Резистивные датчики просты, дают высокий уровень выходного сигнала, малы по габаритам и обладают радиационной стойкостью.

Электромагнитные датчики перемещения бывают двух типов: индуктивные и трансформаторные. В индуктивных датчиках выявляемое перемещение преобразуется в изменение индуктивности за счет изменения параметров магнитной цепи катушки индуктивности. Последнее осуществляется путем либо изменения воздушного зазора в магнитной цепи с помощью подвижного якоря, либо перемещения сердечника внутри катушки. Датчики первого типа служат для выявления малых перемещений 0,1–1,0 мм, а второго – больших до 100 мм. Недостатком таких датчиков является наличие значительной электромагнитной силы, действующей на подвижную часть датчика.

Для снижения этой силы основное применение получили дифференциальные индуктивные датчики (рисунок 7.2, а), собранные по мостовой схеме, где указанные силы от двух катушек взаимно уравновешиваются. Величина погрешности современных индуктивных датчиков перемещения составляет от 0,5 до 2%.

Трансформаторные датчики перемещения (рисунок 7.2, б) преобразуют выявляемую величину в изменение коэффициента взаимной индукции. Такой датчик подобен индуктивному датчику, собранному по дифференциальной схеме, с добавлением вторичных обмоток, с которых снимается выходной сигнал.

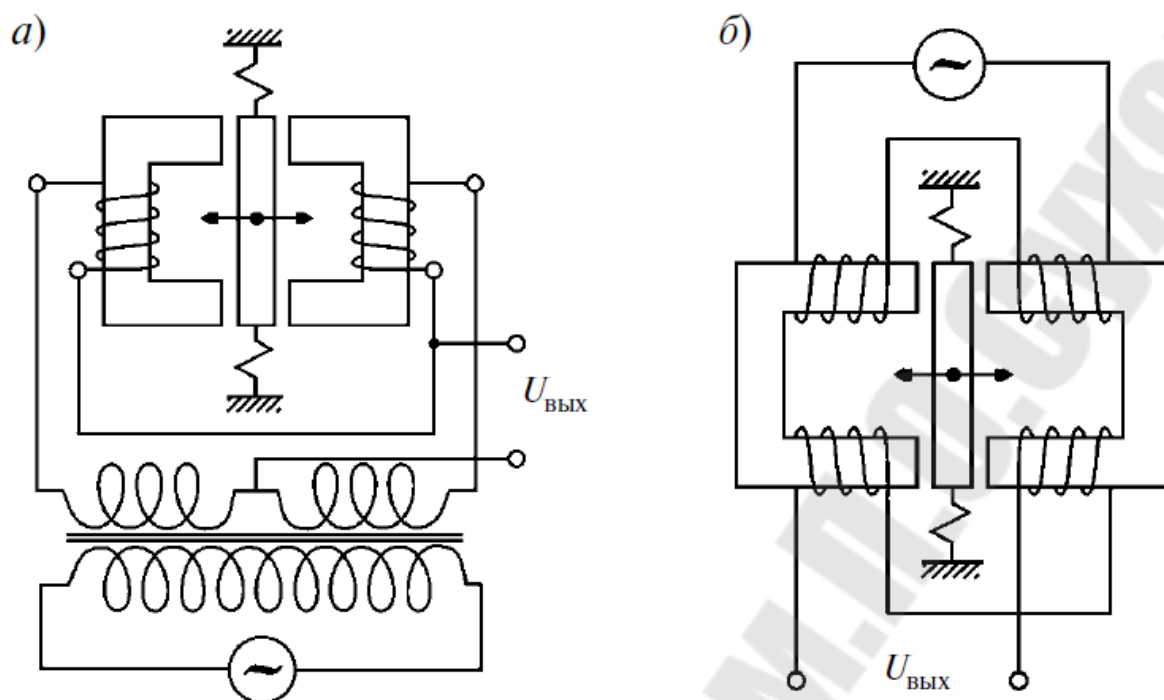


Рисунок 7.2 – Схемы дифференциального индуктивного (а) и трансформаторного (б) датчиков перемещения

К электромагнитным датчикам перемещения относятся синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (резольверы), индуктосины, редуктосины и т. п. датчики в виде специальных электрических машин. Это электрические машины, используемые в режиме генератора как датчики угла поворота. При повороте ротора такой машины ЭДС, генерируемая в его обмотках под действием вращающегося магнитного поля, создаваемого обмотками статора, сдвигается по фазе на тот же угол. Это является мерой угла поворота ротора и в результате последующего преобразования дает напряжение постоянного тока, пропорциональное углу поворота ротора [2]. Основные достоинства этих датчиков, как и всех электромагнитных датчиков, значительная мощность выходного сигнала, а так же гальваническая развязка от сети питания.

Фотоэлектрические (оптические) датчики являются самыми точными датчиками перемещения, в которых перемещения контролируются с помощью луча света. Принцип действия этих датчиков заключается в размещении на контролируемом подвижном объекте экрана с системой отверстий, через которые проходит свет от некоторого источника и регистрируется с другой стороны фотоприемниками. При перемещении экрана изменяются условия их освещения, что и является мерой перемещения. В простейшем варианте такого датчика

угловых перемещений в качестве экрана используется диск с равномерно расположенными прорезями. При повороте диска фотоприемник регистрирует число световых импульсов, которое пропорционально углу поворота. Это импульсный датчик, преобразующий угол поворота в унитарный код. Значительно большую точность обеспечивают кодовые оптические датчики, преобразующие угол поворота в цифровой код. Для этого на диске делается несколько дорожек со щелями. Каждая дорожка определяет разряд двоичного кода выходного сигнала (их может быть до 20): освещение фотоприемника на определенной дорожке соответствует двоичной «единице», а его отсутствия «нулю». Для повышения надежности считывания вместо прямого двоичного кода часто используются коды с избыточностью типа кода Грея. В этом случае ошибка считывания не превышает младшего значащего разряда независимо от того, в каком разряде она произошла. В датчиках линейного перемещения этого типа соответственно вместо диска используется линейки с такими же щелями и дорожками. Существует много различных конструкций подобных оптических датчиков перемещения, в том числе двухшкальные системы грубого и точного отсчета, системы с растровой интерполяцией, со штриховым кодом и др. [2]. Разрешающая способность таких прецизионных угловых датчиков доходит до десятых долей секунды.

Емкостные (электростатические) датчики перемещения преобразуют выявляемое перемещение в величину емкости конденсатора путем изменения расстояния между обкладками (электродами) конденсатора. Существуют такие датчики, в которых изменяется активная площадь пластин конденсатора, например, путем поворота одной пластины относительно другой. Основное применение емкостных датчиков — это измерение малых перемещений, в том числе в датчиках давления и ускорения.

Датчики перемещения на основе эффекта Холла (датчики Холла). Собственно эффект Холла заключается в воздействии магнитного поля на электрический ток. Если к пластине или пленке, по которой идет ток, приложить перпендикулярно ей магнитное поле, между боковыми краями пластины возникнет разность потенциалов. Таким образом непосредственно эффект Холла позволяет создавать датчики магнитной индукции, но он получил распространение и для создания датчиков перемещения пластины с током относительно магнита. В качестве материала пластины используются полупроводники GaAs,

InAs, InSb и др. Погрешность серийно выпускаемых датчиков Холла составляет 0,5–1,0%.

Датчики скорости. Величину скорости линейного и углового перемещения можно получить дифференцированием сигнала от рассмотренных выше датчиков перемещения. Однако более точное значение скорости дают датчики непосредственно чувствующие скорость. Основными типами таких датчиков являются тахогенераторы и дискретные датчики, преобразующие скорость в частоту импульсов.

Тахогенераторы — это генераторы постоянного или переменного тока. Тахогенераторы постоянного тока могут иметь минимальную погрешность ~0,2 %, но они дороже тахогенераторов переменного тока и менее надежны в связи с наличием щеточно-коллекторного узла.

Дискретные датчики скорости вращения осуществляют счет числа оборотов в секунду с последующим преобразованием в код с помощью АЦП. Простейший вариант такого датчика содержит диск с прорезями и с одной его стороны источник света, а с другой фотоприемник в виде фотодиода или фототранзистора. Возможен вариант с использованием света, отраженного от освещенного вала с нанесенными на нем полосками. Существуют и другие типы дискретных датчиков, в которых импульсы от вращающегося вала формируются не оптически, а с помощью магнитов и т. п.

Датчики ускорения — акселерометры. В этих датчиках ускорение выявляется через силу инерции некоторой известной по величине массы:

$$F = m\ddot{x},$$

где $\ddot{x}$ — искомое ускорение. Масса крепится на упругом элементе, например, на пружине или на конце гибкой консоли. Деформация этого элемента, пропорциональная силе инерции, выявляется датчиком силы. В основном нашли применение тензорезистивные и пьезоэлектрические такие датчики.

Тензорезистивные датчики основаны на изменении сопротивления проводников или полупроводников при деформации и последующего преобразования его в электрический сигнал подобно тому, как это делается в резистивных датчиках перемещения. Такие датчики ускорения имеют линейные размеры ~ 10 мм, массу единицы грамм и погрешность менее 1 %.

Пьезоэлектрические датчики ускорения основаны на прямом пьезоэффекте, которым обладают некоторые материалы (сегнетова соль, кварц, турмалин и пьезокерамика — титанат бария, титанат свин-

ца, цирконат свинца и др.). Он заключается в возникновении электрического потенциала на их поверхности при деформации. Погрешность лучших таких датчиков составляет 0,2–0,5 %.

Помимо датчиков ускорения указанные датчики применяются как датчики собственно силы в диапазоне от долей грамма до десятков тонн и в качестве датчиков давления жидкости и газа, которое преобразуется в силу обычно с помощью мембран. Погрешность этих датчиков – десятые и сотые доли процента.

7.3 Выполняемые функции, уровни интеллектуализации и принципы построения ИС. В робототехнике и в некоторых других видах техники из информационно-измерительных систем в особую группу выделяются системы, выдающие аналогично органам чувств живых существ информацию об окружающей внешней среде. Они называются сенсорными системами, а их датчики соответственно сенсорами. По выявляемым свойствам и параметрам сенсорные системы роботов можно разделить на следующие группы:

- 1) системы, дающие общую картину окружающей среды с последующим выделением ее отдельных объектов;
- 2) системы, определяющие различные физико-химические свойства внешней среды и ее конкретных объектов;
- 3) системы, определяющие координаты местоположения робота и параметры его движения, включая координаты относительно объектов внешней среды.

К сенсорным системам первой группы относятся системы технического зрения и различного типа локаторы. Вторая группа сенсорных систем наиболее многообразна: измерители геометрических параметров, плотности, температуры, оптических свойств, химического состава и т. д. Третья группа определяет параметры, относящиеся к самому роботу: его географические координаты в пространстве от спутниковых систем до использующих магнитное поле Земли, измерители угловых координат, перемещения и скорости, в том числе и относительно отдельных объектов внешней среды вплоть до фиксации соприкосновения с ними.

В составе роботов все эти сенсорные системы служат прежде всего для обслуживания двух исполнительных систем: манипуляционной и передвижения. Это и определяет основные требования к сенсорным системам: дальность действия, точность, быстродействие и т. д.

Сенсорные системы, обслуживающие манипуляторы, образуют две группы: системы, входящие в контур управления движением манипулятора, и системы очувствления его рабочего органа.

В число последних систем, в частности, часто входят размещенные у рабочего органа манипулятора системы технического зрения и датчики усилий.

Сенсорные системы, используемые в системах передвижения робота, подразделяются на системы, обеспечивающие навигацию в пространстве, и системы, обеспечивающие безопасность движения (предотвращения столкновений с препятствиями, опрокидывания на уклонах, попадания в недопустимые для робота внешние условия и т. п.).

Важным параметром сенсорных систем является дальность действия. По этому показателю сенсорные системы роботов можно разделить на: контактные, ближнего, дальнего и сверхдальнего действия.

Контактные сенсорные системы применяются для очувствления рабочих органов манипуляторов и корпусов (бамперов) мобильных роботов. Они позволяют фиксировать контакт с объектами внешней среды (тактильные сенсоры), измерять усилия, возникающие в месте этого контакта (силовые сенсоры), определять проскальзывание объектов при их удержании захватным устройством манипулятора. Контактным сенсорным системам свойственна простота, но они накладывают существенные ограничения на динамику и прежде всего на быстродействие управления роботом.

Тактильные сенсоры помимо получения информации о контакте могут применяться и для определения размеров и формы объектов путем их ощупывания. Важным требованием, предъявляемым к этим устройствам, является высокая чувствительность (срабатывание при усилиях в единицы грамм), малые габариты, механическая прочность и надежность.

Сенсорные системы ближнего действия обеспечивают информацией об объектах, расположенных в непосредственной близости от рабочего органа манипулятора или корпуса робота, т. е. на расстояниях, соизмеримых с их размерами. К таким системам относятся оптические локаторы и дальномеры, дистанционные измерители плотности грунта и т. п. Такие бесконтактные устройства технически сложнее контактных, но позволяют роботу выполнять задания с большой скоростью, заранее выдавая информацию о различных объектах и средах до соприкосновения с ними.

Сенсорные системы дальнего действия служат для получения информации о внешней среде в объеме всей рабочей зоны манипуляторов робота и окружающей среды мобильного робота.

Сенсорные системы сверхдальнего действия применяются главным образом в мобильных роботах. К ним относятся различные навигационные системы, локаторы и другие сенсорные системы соответствующей дальности действия. Эти устройства находят применение и в стационарных роботах при работе с подвижными объектами, чтобы заранее предвидеть их появление в рабочей зоне. Сенсорные системы дальнего и сверхдальнего действия могут размещаться как на роботе, так и вне его (для получения информации со стороны).

В бесконтактных сенсорных системах для получения требуемой информации используются излучаемые ими специальные сигналы (оптические, радиотехнические, ультразвуковые и т. д.) и естественные излучения среды и ее объектов. В зависимости от этого различают активные и пассивные сенсорные системы.

Активные сенсорные системы имеют передатчик, излучающий первичный сигнал, и приемник, регистрирующий прошедший через среду- прямой сигнал или вторичный сигнал, отраженный от объектов среды или сгенерированный ими под воздействием первичного сигнала.

Пассивные системы имеют только приемное устройство, а роль излучателя играют сами объекты внешней среды. Поэтому пассивные сенсорные системы обычно проще и дешевле активных, но менее универсальны. Для некоторых применений важна также скрытность действия пассивных систем.

Для оцувствления роботов наиболее широкое применение получили системы технического зрения, локационные, силомоментные и тактильные системы. Самыми универсальными из них являются системы технического зрения.

Требования, предъявляемые к сенсорным системам, существенно зависят от того уровня системы управления, на котором используется их информация. В частности, наибольшее быстроедействие должны иметь сенсорные системы, используемые на уровнях управления, функционирующих в реальном времени, с неизбежным при этом упрощением этой информации. Наоборот, на стратегическом уровне управления поведением робота требуется наиболее полная информация в ущерб, возможно, быстроедействию.

ТЕМА 8 КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ МОДУЛЕЙ И РОБОТОВ

8.1 Положения концептуальной основы проектирования мехатронных систем. В основу методики проектирования ММ положен принцип синергетической интеграции. Задача конструктора при синергетической интеграции состоит в том, чтобы не просто связать отдельные части в систему с помощью типовых соединений и преобразователей, но сделать конструктивные связи в мехатронном модуле взаимопроникающими и неразрывными [1]. Большинство успешных решений в мехатронике базируется скорее на инженерном опыте и интуиции, чем на научной методологии. Добиться качественно новых характеристик позволяет современная концепция «встроенного проектирования», которая предполагает конструктивную интеграцию элементов модуля в едином корпусе.

Принятый подход к проектированию ММ предполагает совместный анализ функциональной, структурной и конструктивной моделей устройства. Целью проектирования ММ является преобразование исходных требований в конструкторскую реализацию и соответствующую документацию, по которой может быть изготовлен модуль, удовлетворяющий сформулированным показателям качества.

8.2. Алгоритм проектирования мехатронного модуля. Алгоритм проектирования ММ (рисунок 8.1) предусматривает три основных этапа проектирования: последовательно выполняемые функциональный, структурный и конструктивный анализ и синтез ММ. Применяя процедуры функционально структурного и структурно-конструктивного анализа, разработчик оценивает принимаемые решения, стремясь добиться высокого уровня синергетической интеграции элементов. Для использования методов автоматизированного проектирования формируют взаимосвязанные функциональную (F-модель), структурную (S-модель) и конструктивную (C-модель) модели ММ.

Конструирование ММ включает три основных этапа:

- а) выбор вариантов структурных решений модуля по его заданной функции;
- б) функционально структурный анализ (входной информацией для этого этапа проектирования является F-модель, а на выходе формируется S-модель ММ);

в) структурно-конструктивный анализ конструкторских решений и построение С-модели ММ;

г) конструкторская реализация выбранного варианта модуля с разработкой конструкторской документации.

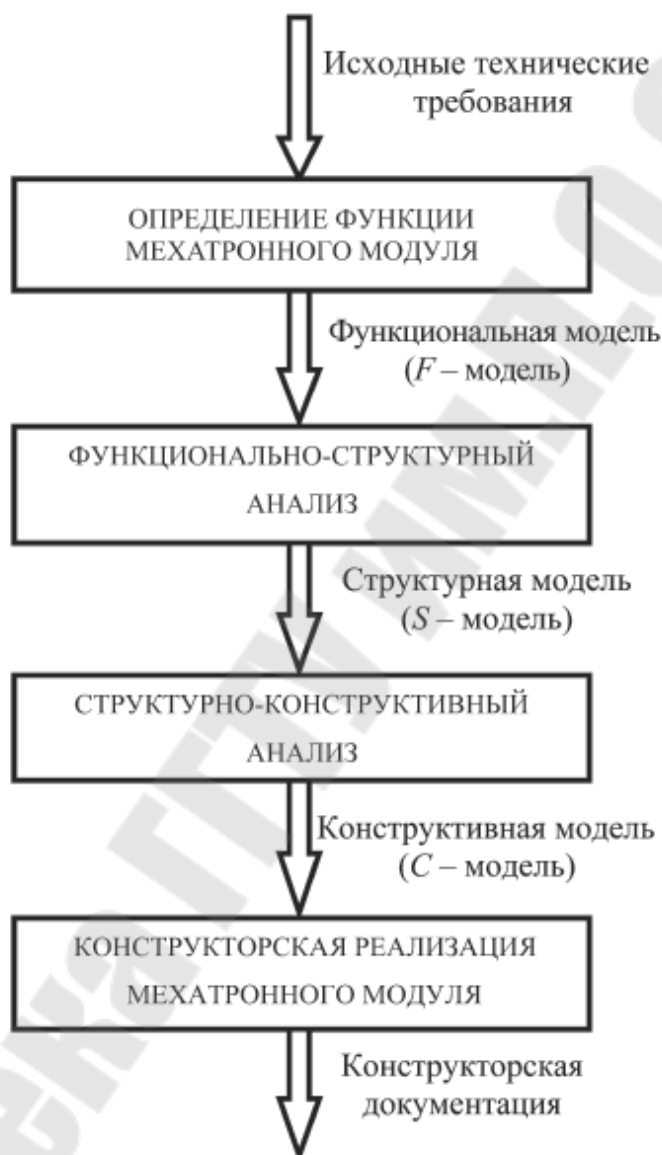


Рисунок 8.1 – Алгоритм проектирования мехатронного модуля

Задача проектирования ММ заключается в нахождении наилучшего соответствия между заданной функцией и конструктивным исполнением.

Ключевой методологической идеей данного подхода является приоритет функции модуля над его структурной организацией и конструктивным решением. В ММ заданные функциональные преобразования могут быть реализованы несколькими наборами структурных

блоков, а эти блоки, в свою очередь, могут иметь различное конструкторское исполнение. Таким образом, при проектировании модуля его структура и конструктивное решение являются подчиненными по отношению к заданной функции.

8.3 Функция и структура мехатронного модуля. Известны два основных подхода к построению моделей сложных технических систем. Первый заключается в функциональном определении рассматриваемой системы через ее поведение по отношению к внешним объектам и внешней среде. Второй подход основан на структурном описании состава системы и связей между ее элементами. Исследование и оптимизация взаимосвязи между функцией и структурой системы лежит в основе функционально-структурного подхода, который соответствует первым двум этапам проектирования ММ (рисунок 8.1).

На первом этапе проводят функциональный анализ ММ, результатом которого является построение функциональной модели. Основная функциональная задача ММ заключается в преобразовании информации о программе движения в целенаправленное управляемое движение выходного звена. Программа движения может быть задана управляющим компьютером как набор команд высокого уровня или, в случае дистанционного управления, человеком-оператором с помощью человеко-машинного интерфейса. Управляемое движение осуществляется механической подсистемой ММ, и его конечное звено взаимодействует с объектами внешней среды. Внешние воздействия должны эффективно отражаться ММ в процессе движения. Информационная обратная связь необходима для оценки текущего состояния ММ как объекта управления и внешней среды в режиме реального времени.

Обозначенная основная функция не является единственной. Некоторые дополнительные функции — реконфигурация системы, обмен сигналами и информацией с другим технологическим оборудованием, самодиагностика, также должны быть реализованы для эффективной и надежной работы ММ. Но именно выполнение функционального движения является основной мехатронной функцией, так как механическая составляющая взаимодействует с объектами работ и таким образом определяет поведение модуля во внешней среде.

В общем случае функциональная модель мехатронного модуля может быть определена как информационно-механический преобразователь.

Для физической реализации мехатронного информационно-механического преобразования необходим внешний энергетический источник. Пусть ММ имеет электрический привод. Тогда, очевидно, требуется источник электроэнергии. Ввод соответствующих электро-энергетических преобразований дает F -модель ММ (рисунок 8.2).

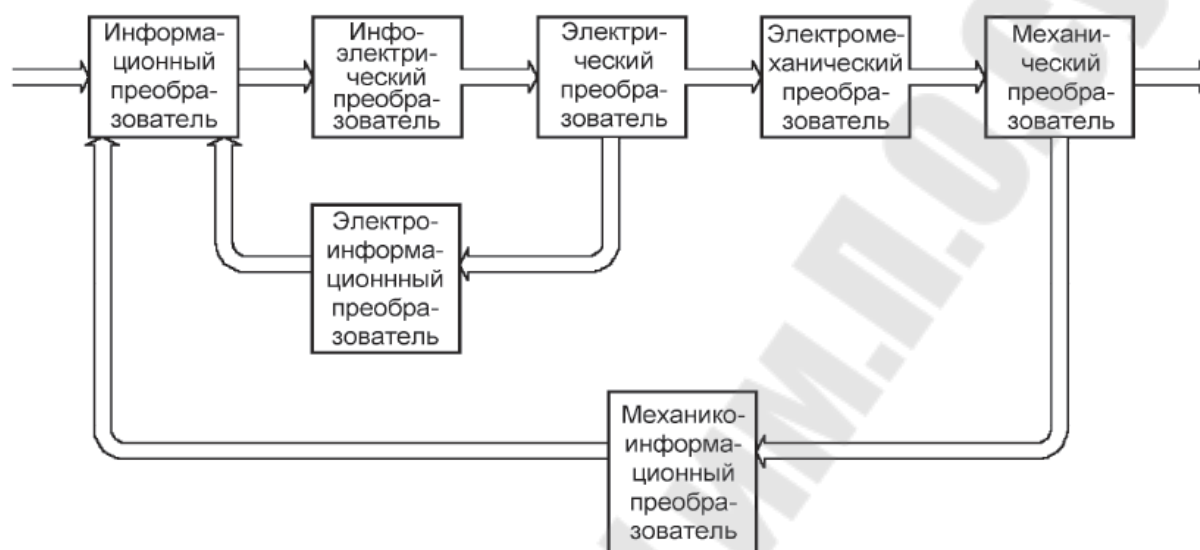


Рисунок 8.2 – Функциональная модель мехатронного модуля

Полученная F -модель в общем случае содержит семь базовых функциональных преобразователей, связанных энергетическими и информационными потоками. Электрическая энергия является только промежуточной энергетической формой между входной информацией и выходным механическим движением. Следовательно, электрическая подсистема не является единственно возможной для выполнения мехатронной функции. Другие виды энергетических процессов (в частности, гидроэнергетические) могут быть использованы для промежуточных преобразований и должны рассматриваться как альтернативные варианты на этапе концептуального проектирования. Выбор разработчиком ММ физической природы промежуточного преобразователя определяется возможностями технической реализации, исходными требованиями и особенностями его применения. В современной инженерной практике гидравлические, пневматические, химические и другие виды энергетических преобразователей применяются достаточно широко.

В любом ММ необходимо реализовать семь функциональных преобразований (рисунок 8.2). Три из них называются моноэнергетическими (информационный, электрический и механический преобра-

зователи), где входные и выходные переменные имеют одну и ту же физическую природу. Остальные четыре являются дуальными (двойственными), так как в них входные и выходные переменные принадлежат различным физическим видам. К этой группе относят информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи функциональной модели, и параллельные электро-информационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Структурная модель ММ должна отражать состав его элементов и связи между ними. В теории автоматического управления и электромеханике принято структурные модели графически представлять в виде блок-схем. Звенья обычно обозначают в виде прямоугольника с указанием входной и выходной переменных, а уравнения или характеристики записывают внутри него.

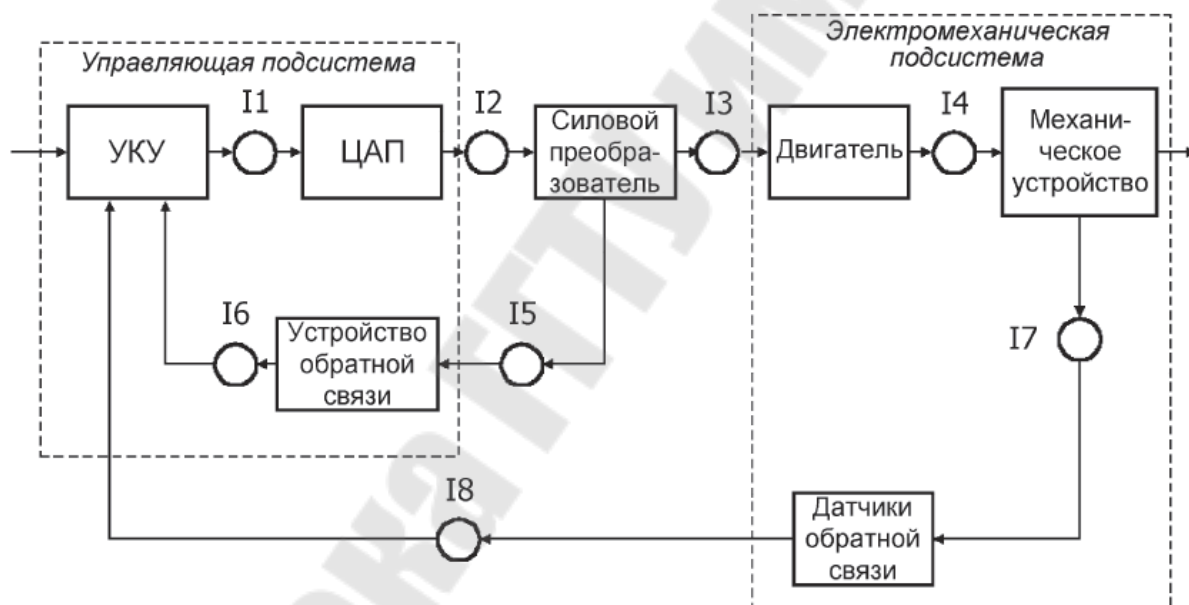


Рисунок 8.3 – Структурная модель электропривода с компьютерным управлением

В качестве исходной структуры ММ рассмотрим традиционный электропривод с компьютерным управлением (*S*-модель, см. рисунок 8.3). Для дальнейшего анализа в представленной структурной схеме выделим управляющую и электро-механическую подсистемы. При конструировании ММ особый интерес представляет исполнительная часть, входящая в состав электромеханической подсистемы. *S*-модель электропривода (рисунок 8.3) включает в себя следующие основные элементы:

- 1) механическое устройство, которое реализует заданное управляемое движение и взаимодействует с внешними объектами (в модулях в качестве таких устройств применяют редукторы, вариаторы, либо непосредственно используют рабочий орган, например, в ММ типа «*мотор-шпиндель*»);
- 2) управляемый электродвигатель (переменного или постоянного тока), который является электромеханическим элементом привода;
- 3) силовой преобразователь, обычно состоящий из усилителя мощности, широтно-импульсного модулятора (ШИМ) и трехфазного инвертора (для асинхронных двигателей);
- 4) цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), реализующий функцию информационно-электрического преобразования;
- 5) устройство обратной связи, которое используют для контроля текущих напряжений и токов в силовом преобразователе, а также управляющих функций (например, для организации контура регулирования момента, развиваемого приводом);
- 6) датчики обратной связи по положению и скорости движения выходного звена механического устройства, выполняющие функции механико-информационного преобразования;
- 7) компьютерное устройство управления движением, функциональной задачей которого является информационное преобразование (обработка цифровых сигналов, цифровое регулирование, расчет управляющих воздействий, обмен данными с периферийными устройствами);
- 8) интерфейсные устройства, обозначенные на блок-схеме как I1–I8.

В зависимости от физической природы входных и выходных переменных интерфейсные блоки могут быть как механическими преобразователями движения, так и содержать электронные аппаратно-программные компоненты. Примерами механических интерфейсов являются передачи и трансмиссии, связывающие выходное механическое устройство с двигателем (интерфейс I4) и датчиками обратной связи (интерфейсы I7, I8).

Интерфейсные электронные устройства расположены на входах и выходах устройства компьютерного управления (УКУ), предназначены для его сопряжения со следующими структурными элементами:

- а) цифро-аналоговым преобразователем (встроенный интерфейс I1) и далее с силовым преобразователем модуля (интерфейс I2);
- б) датчиками обратной связи (интерфейс I7), в случае применения сенсоров с аналоговым выходным сигналом соответствующие интер-

фейсы строятся на основе аналого-цифровых преобразователей (АЦП);

в) устройствами обратной связи для контроля уровня электрических токов и напряжений в силовом преобразователе (для традиционного привода интерфейс I6 также использует стандартный АЦП).

8.4 Синергетическая интеграция в мехатронных модулях. Сравнивая функциональную модель ММ (рисунок 8.2) и структурную модель традиционного электропривода (рисунок 8.3), можно сделать вывод о том, что суммарное количество основных и интерфейсных блоков в структуре электропривода значительно превышает число необходимых функциональных преобразователей. Другими словами, можно говорить о структурной избыточности традиционного электропривода. Наличие избыточных блоков приводит к снижению надежности и точности технической системы, ухудшению ее массогабаритных и стоимостных показателей. Поэтому целесообразно стремиться к сокращению количества сепаратных структурных элементов (как основных, так и интерфейсных блоков) в системе.

В идеальном для пользователя варианте модуль по рисунку 8.3, приняв на информационный вход программу движения, должен выполнить целенаправленное управляемое движение с заданными показателями качества. При этом все проблемы интеграции в модуле механических, электронных и управляющих устройств должны быть решены разработчиком для всех стадий жизненного цикла, начиная со стадии проектирования системы и заканчивая ее эксплуатацией у конечного потребителя.

Синергетическая интеграция элементов при проектировании ММ основана на трех базовых принципах:

1) реализация заданных функциональных преобразований минимально возможным числом структурных и конструктивных блоков путем объединения двух и более элементов в единые многофункциональные модули;

2) выбор интерфейсов в качестве локальных точек интеграции и исключение избыточных структурных блоков и интерфейсов как сепаратных элементов;

3) перераспределение функциональной нагрузки в ММ от аппаратных блоков к интеллектуальным (электронным и компьютерным) компонентам.

Практическая реализация принципов синергетической интеграции при проектировании позволяет обеспечить основные преимущества ММ по сравнению с традиционными машинами и добиться качественно новых показателей, в первую очередь, по компактности конструкции, скорости и точности движений. Снятие с аппаратной части системы функциональной нагрузки и ее перенос на управляющую и электронную подсистемы придает ММ свойство гибкости, делает его способным к легкому приспособлению для решения новых технологических задач. Таким образом, интеграция предполагает не только аппаратное объединение элементов, но и организацию интегрированных информационных процессов в ИММ. Синергетическую интеграцию в мехатронике осуществляют при проектировании двумя основными способами – функционально-структурной интеграцией и структурно-конструктивной интеграцией, которые объединяют в общий алгоритм проектирования ММ.

Задачей этапа функционально-структурной интеграции (ФС-интеграции) является поиск мехатронных структур, реализующих заданные функциональные преобразования с помощью минимального количества структурных блоков. ФС-интеграция направлена на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение некоторых основных блоков, а значит, и смежных с ними интерфейсов из структуры системы.

Примеры мехатронных проектных решений, основанные на способе ФС-интеграции элементов, приведены в таблице 8.1. Представленные решения основаны на совместном анализе F -модели ММ (рисунк 8.2) и S -модели традиционного электропривода (рисунок 8.3).

Первые два мехатронных решения относятся к электромеханической подсистеме модуля, следующие варианты интеграции можно реализовать в его управляющей подсистеме. При конструировании ММ наибольшее внимание уделяют решениям, направленным на упрощение механической части модулей и связанных с ней блоков и интерфейсов, которые реализуют электромеханическое и механико-информационные функциональные преобразования.

Первый вариант (см. таблицу 8.1) предусматривает использование в обратной связи вместо двух отдельных датчиков положения и скорости только одного элемента - например фотоимпульсного датчика, который позволяет получать информацию и об угле поворота вала, и о его угловой скорости. Датчик выдает выходной сигнал в кодовой форме, что позволяет вводить информацию в УКУ без допол-

нительного аналого-цифрового преобразования, которое было необходимо для традиционных датчиков с аналоговым выходным сигналом (тахогенераторов, потенциометров и т. п.).

Таблица 8.1 – ФС-интеграция элементов в мехатронном модуле

Мехатронное решение	Функциональное преобразование	Исключаемые сепаратные элементы	
		Основные блоки	Интерфейсы
Фотоимпульсный датчик обратной связи	Механико-информационное	Один датчик обратной связи	17, 18
Вентильный высокомоментный двигатель	Электромеханическое и механико-информационное	Механическое устройство, сепаратные датчики обратной связи	14, 17, 18
Интеллектуальный силовой преобразователь	Информационно-электрическое	Избыточное устройство обратной связи	15, 16
Управляющие контроллеры на базе блоков FPGA	Электро-информационное	Цифро-аналоговый преобразователь	11, 12

Интеллектуализацию фотоимпульсного датчика обеспечивают встроенными микропроцессорами, которые выполняют следующие основные функции: кодирование информации датчика, обнаружение ошибок измерения, масштабирование сигнала и передача текущего кода в контроллер движения по стандартному протоколу. Современная тенденция в создании фотоимпульсных датчиков заключается в объединении в едином сенсорном модуле конструктивных элементов (вала с подшипниковыми узлами), кодировочных дисков, фотоэлементов и микропроцессора. Таким образом, использование фотоимпульсного датчика позволяет исключить из структуры традиционного привода один датчик обратной связи с его интерфейсом (I7), а также АЦП на входе УКУ (интерфейс I8).

Применение высокомоментного двигателя [1] (второе решение в таблице 8.1) позволяет заменить исполнительную пару «двигатель + преобразователь движения» на один приводной элемент - двигатель. Этот способ ФС-интеграции означает исключение механического устройства и избыточного интерфейса I4 из структуры привода. Основные преимущества ММ с высокомоментными двигателями следующие:

- 1) снижение материалоемкости, компактность и модульность конструкции;
- 2) повышение точностных характеристик привода благодаря отсутствию зазоров, кинематических погрешностей, упругих деформации звеньев и т. д.;
- 3) исключение трения в механической трансмиссии, что позволяет избежать нелинейных динамических эффектов, особенно на ползучих скоростях.

Для определения положения полюсов на роторе в конструкцию вентильного высокомоментного двигателя встраивают датчик положения. В исполнительных приводах информацию с этого датчика можно использовать как сигнал обратной связи. Поэтому, применение вентильных двигателей со встроенными фотоимпульсными датчиками позволяет упростить не только механическую часть модуля, но и цепь обратной связи, а разработчику не требуется вводить в конструкцию модуля отдельные датчики положения и скорости.

Два примера применения способа ФС-интеграции к элементам управляющей подсистемы модуля приведены в таблице 8.1. В состав ММ могут входить интеллектуальные силовые преобразователи (ИСП). Их строят на базе полупроводниковых приборов нового поколения. Типичными представителями этих приборов являются силовые полевые транзисторы (*MOSFET*), биполярные транзисторы с изолированным затвором (*IGBT*), запираемые тиристоры с полевым управлением (*MCT*). Особенность ИСП состоит в том, что они содержат встроенные блоки микроэлектроники, предназначенные для выполнения интеллектуальных функций – управление движением, защита в аварийных режимах и диагностика неисправностей. Использование ИСП в составе ММ позволяет существенно снизить массогабаритные показатели силовых преобразователей, повысить их надежность при эксплуатации, улучшить технико-экономические показатели.

Использование контроллеров движения с блоками *FPGA* [22] позволяет исключить цифроаналоговое преобразование сигналов при компьютерном управлении двигателем. На выходе блоков *FPGA* сразу формируется широтно-модулированный сигнал, который имеет цифровое представление. При этом они обладают уникальным сочетанием очень высокой производительности (скорость вычислений сопоставима с аппаратными компонентами) с возможностью программирования как обычных микропроцессорных устройств.

Обобщая рассмотренные примеры видно, что точками для ФС-интеграции являются структурные блоки, реализующие функциональные преобразования только дуального типа (см. третий столбец таблицы 8.1). К этой группе относят информационно-электрический и электромеханический преобразователи, расположенные в прямой цепи *F*-модели ММ (рисунок 8.3), и электроинформационный и механико-информационный преобразователи в цепи обратной связи.

Структурно-конструктивная интеграция (СК-интеграция) основана на анализе *S*-модели ММ, которая сформирована на этапе ФС-интеграции. Заданная структура модуля может быть реализована различными конструктивными решениями. СК-интеграция нацеливает разработчика на выбор проектных решений, которые обеспечивают исключение интерфейсов как сепаратных блоков путем встраивания их в отдельный корпус. При автоматизированном проектировании принятые решения представляют в виде *S*-модели (рисунок 8.12).

Методическим ключом при поиске вариантов СК-интеграции является рассмотрение интерфейсных блоков I1-I8 в качестве локальных точек, где потенциально возможна СК-интеграция. Можно рекомендовать при проектировании опираться сразу на несколько точек интеграции.

Примеры ММ, основанные на способе СК-интеграции элементов, приведены в таблице 8.2. Представленные решения основаны на анализе структурных моделей мехатронных модулей, разработанных на предыдущем этапе, и традиционного электропривода (см. рисунок 8.3).

Таблица 8.2 – СК-интеграция элементов в мехатронном модуле

Мехатронные модули	Функциональные преобразования	Встраиваемые элементы	
		Основные блоки	Интерфейсы
Модуль движения	Электромеханическое и механическое	Двигатель, механическое устройство	I4
Мехатронный модуль движения	Электромеханическое, механическое и механико-информационное	Двигатель, механическое устройство, датчик обратной связи	I4, I7, I8
Интеллектуальный мехатронный модуль	Информационное, информационно-электрическое, электрическое, электромеханическое	Управляющий контроллер, силовой преобразователь, двигатель	I1, I2, I3, I5, I6

Интеграция элементов в ММ является ведущей тенденцией при создании современных машин и систем, так как позволяет добиться качественно нового уровня по основным техническим показателям, таким как скорости и точности движения, компактности конструкции и способности машины к быстрой реконфигурации. Практическое воплощение этой тенденции в машинах сегодняшнего дня зависит от эффективности взаимодействия конструктора, который выдвигает новые интеграционные идеи, и технолога, реализующего предложенные проектные решения в автоматизированных технологических процессах.

8.5 Модульный принцип построения роботов. Параметры ПР устанавливаются, исходя из особенностей согласования робота с обслуживаемым технологическим оборудованием и организацией рабочей среды. В этом отношении наибольшими преимуществами обладают агрегатные конструкции роботов. Принцип агрегатирования в роботостроении получает всё большее распространение, т.к. позволяет резко сократить сроки проектирования, снизить затраты на разработку и внедрение ПР, которые собираются из унифицированных модулей, а также облегчает обслуживание ПР при эксплуатации. При этом РТК, создаваемые на базе ПР с унифицированными модулями, являются более гибкими при переналадке в случае перевода производства на выпуск новой продукции. Особенности модульного принципа построения ПР проиллюстрированы на рис. 35, где показано, как, наращивая структуры роботов типовыми кинематическими звеньями линейного (П) и вращательного (В) перемещений, можно обеспечить любую компоновку ПР работающего в требуемой СК.

Анализ конструктивных компоновок моделей ПР позволяет принять обобщенную структуру механической системы, представляющую собой последовательное соединение основных модулей: основания, колонны (стойки), руки, кисти, операционных модулей и схвата. Для мобильного ПР добавляются дополнительные модули: направляющие в напольном или подвесном исполнениях и тележка в тех же исполнениях. Модульное построение ПР можно проиллюстрировать ещё одним рисунком (рисунок 8.5), на котором представлен набор унифицированных модулей подвижного 1, не подвижных 9 и 10 оснований базового модуля 2 для установки и вращения колонны с механизмом 3 возвратно-поступательного вертикального перемещения или механизмом качания 8 руки 7, на которую крепится кисть,

либо технологические механизмы 4 или 6, соответственно вращения или наклона захватных органов 5.

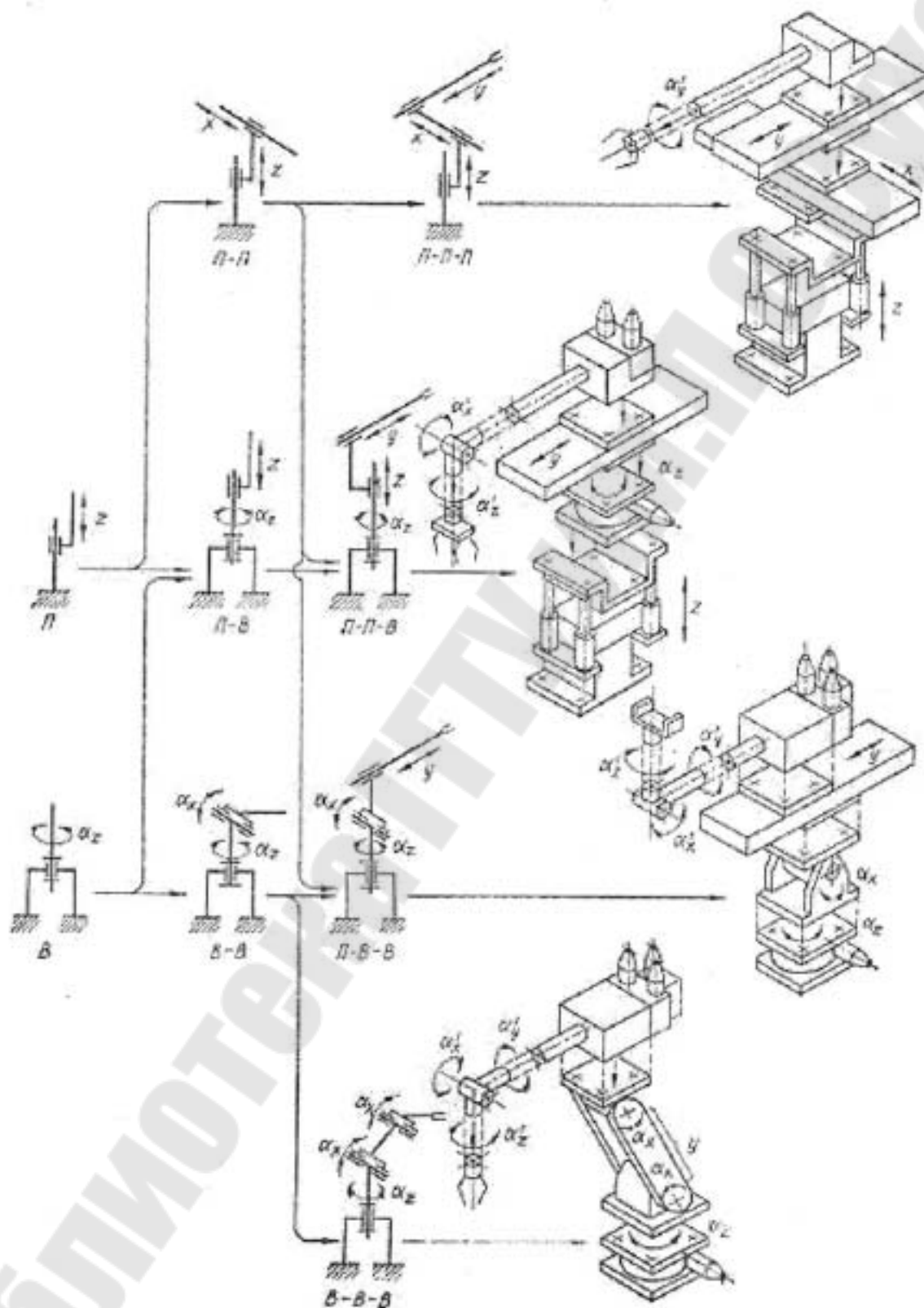


Рисунок 8.4 – Принцип наращивания структуры РР звеньями линейного (П) и вращательного (В) перемещений

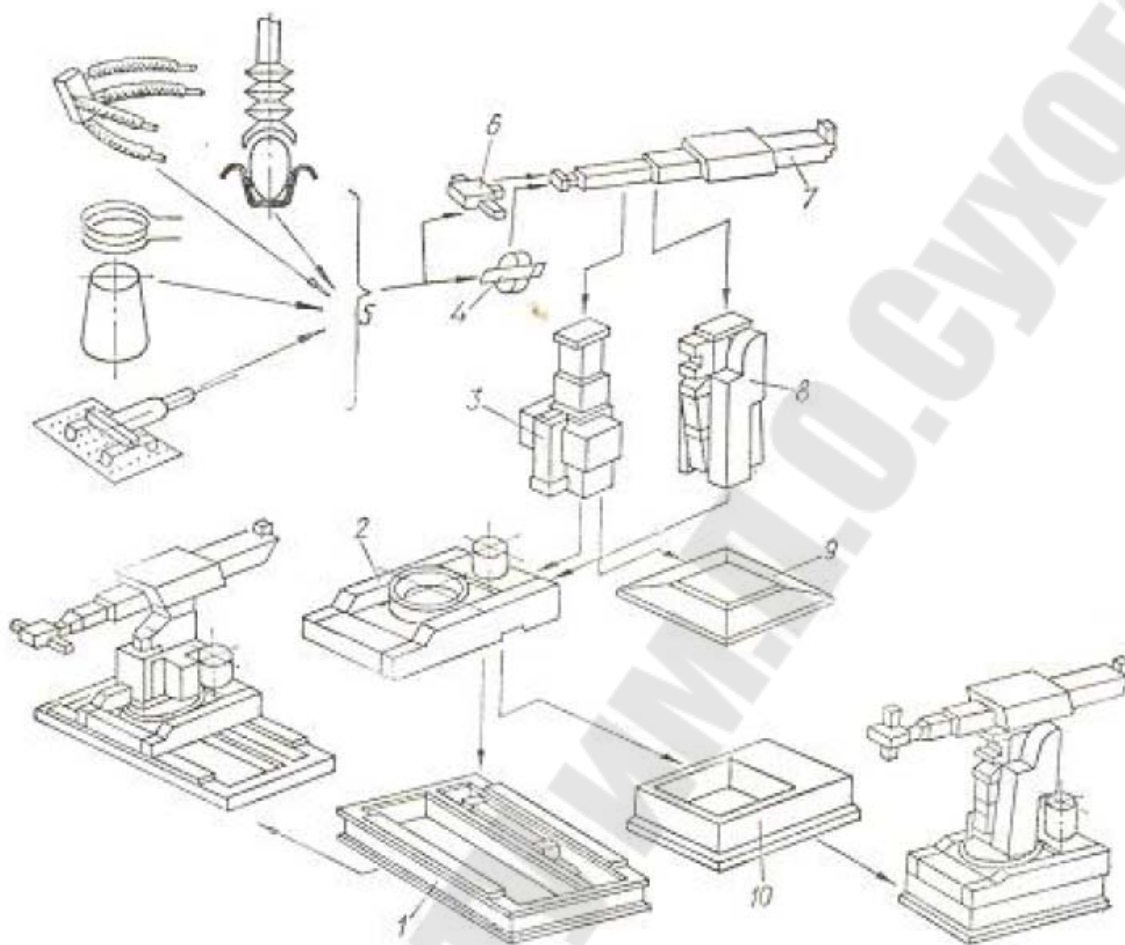


Рисунок 8.5 – Набор унифицированных модулей ПР

Из рисунка 8.5 видно, что необходимую компоновку ПР можно получить путем сочетания различных функциональных унифицированных модулей: стационарные, с подвижным основанием, подвесные, одно и двурукие, работающие в декартовой, цилиндрической или сферической системах координат. Требования быстрой переналаживаемости ПР обуславливает использование в парах рука-кисть, кисть – технологический механизм, технологический механизм – схват унифицированных элементов соединения, обеспечивающих быструю смену модуля при переналадке. Переналаживаемость роботов с развитой кинематической структурой зависит от полноты унифицированных его схватов, типа и возможностей СУ. Поскольку технологическая и функциональная универсальность ПР в значительной степени определяется возможностями кинематической цепи, кисть – технологический механизм – схват и характеристикой обеспечиваемых ею локальных движений. Практический интерес представляет рассмотрение возможных компоновок этой цепи и конструктивное располо-

жение схватов. Наиболее распространенные варианты сочетания степеней подвижности кисти реализуются устройствами, представленными на рисунке 8.6. В частности, показанные на рисунке 8.6, *а* компоновки обеспечивают технологические установочные перемещения схвата или его вращения (качение) при совершении ориентирующих движений. На рисунке 8.6, *б* приведены компоновки, обеспечивающие схвату сложные пространственные движения: вращение и технологическое перемещение или вращение и качение. Использование сдвоенного схвата позволяет повысить маневренность и универсальность ПР при выполнении и обслуживании технологической операции.

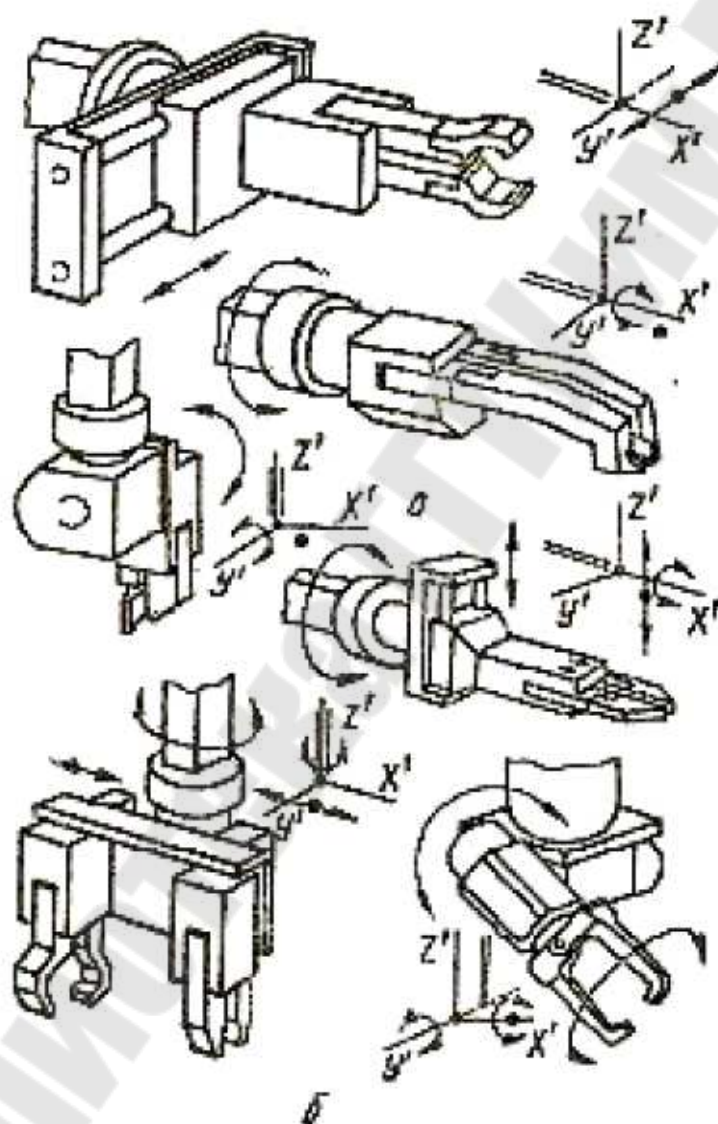


Рисунок 8.6. Механизмы, реализующие наиболее распространенные варианты сочетания степеней подвижности кисти ПР

Литература

1. Мехатроника / Т. Исии [и др.]. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
2. Накано, Э. Введение в робототехнику / Э. Накано ; пер. с яп. ; под ред. А. М. Филатова. – М. : Мир, 1988. – 335 с.
3. Попов, Е. П. Основы робототехники: введение в специальность: учебник для вузов по спец. «Робототехн. системы и комплексы» / Е. П. Попов, Г. В. Письменный. – М. : Высш. шк., 1990. – 222 с.
4. Робототехника / под ред. Е. П. Попова, Е. И. Юревича. – М. : Машиностроение, 1984. – 287с.
5. Чигарев, А. В. Введение в мехатронику : учеб. пособие для вузов / А. В. Чигарев, К. Циммерман, В. А. Чигарев. – Минск : БИТУ, 2013. – 387 с.
6. Жмудь, В. А. Динамика мехатронных систем : учеб. пособие / В. А. Жмудь, Г. А. Французова, А. С. Востриков. – М. ; Берлин : Директ-Медиа, 2021. – 241 с.
7. Подураев, Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение / Ю. В. Подураев. – М. : Машиностроение, 2006. – 256 с.
8. Камлюк, В.С. Мехатронные модули и системы в технологическом оборудовании для микроэлектроники : учеб. пособие / В. С. Камлюк, Д. В. Камлюк. – Минск : РИПО, 2016. – 383 с.
9. Компоненты приводов мехатронных устройств : учебное пособие / С. В. Пономарев, А. Г. Дивин, Г. В. Мозгова [и др.] ; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2014. – 295 с.
10. Ступина, Е. Е. Основы робототехники : учеб. пособие / Е. Е. Ступина, А. А. Ступин, Д. Ю. Чупин, Р. В. Каменев – Новосибирск : Сибпринт, 2019. – 160 с.
11. Введение в специальность «Мехатроника и робототехника» : курс лекций / Б. М. Готлиб, А. А. Вакалюк. – Екатеринбург : УрГУПС, 2012. – 134 с.
12. Шоланов, К. С. Основы мехатроники и робототехники : учебник для студентов технических специальностей вузов Казахстана. – Алматы : ЭВЕРО, 2015. – 126 с.

Содержание

1	Тема 1. Общие понятия о мехатронике и робототехнике	3
2	Тема 2. Основные направления развития мехатроники и робототехники.	8
3	Тема 3. Технологическое обеспечение мехатронных и робототехнических систем	21
4	Тема 4. Требования к мехатронным и робототехническим модулям и системам	32
5	Тема 5 Мехатронные машины и робототехнические системы	42
6	Тема 6 Интеллектуальные мехатронных и робототехнических системы	57
7	Тема 7 Информационные устройства мехатронных и робототехнических систем	66
8	Тема 8 Концепция проектирования мехатронных модулей и роботов	78
9	Литература	93

Стасенко Дмитрий Леонидович
Хазеев Егор Валерьевич

ОСНОВЫ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ

**Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей 1-36 01 01
«Технология машиностроения» и 1-53 01 01
«Автоматизация технологических процессов
и производств (по направлениям)»
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 13.11.25

Рег. № 144Е
<http://www.gstu.by>