

Министерство образования и науки Республики Казахстан  
Костанайский государственный университет им. А. Байтурсынова  
Кафедра программного обеспечения

**П. Летвинко**  
**О. Салькова**

## **ОСНОВЫ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТОТЕХНИКИ**

Учебное пособие для магистрантов специальности  
6М072400 – Технологические машины и оборудование  
Траектория: Мехатроника  
Образовательная программа: Инновационное производство и автоматизация  
индустриальной техники  
Направление ГПИИР-2: Машиностроение

**Костанай, 2016**

**УДК 004.896(075.8)**  
**ББК 32.816я73**  
**О-75**

Утверждено учебно-методическим советом Костанайского государственного университета имени А.Байтурсынова протокол от 28.04. 2016 г. № 3.

**Рецензенты:**

Жунусов Куат Маратович, к.э.н., зав.кафедрой «Информационные технологии» Костанайского инженерно-экономического университета имени М.Дулатова  
Иванова Ирина Владимировна, к.п.н., старший преподаватель кафедры программного обеспечения КГУ имени А. Байтурсынова  
Жикеев Азамат Айтпаевич, к.т.н., старший преподаватель кафедры информационных систем КГУ имени А. Байтурсынова

**Составители:**

Летвинко Полина Сергеевна старший преподаватель кафедры программного обеспечения  
Салыкова Ольга Сергеевна, к.т.н., доцент кафедры программного обеспечения

О-75 «Основы мехатроники и робототехники»: учебное пособие по дисциплине для магистрантов специальности 6М072400 Технологические машины и оборудование (траектория Мехатроника)/ составители: Летвинко П.С., Салыкова О.С.– Костанай: КГУ имени А.Байтурсынова, 2016 г.- 58 с.

ISBN 978-601-7481-60-5

Учебное пособие охватывает содержание дисциплины «Основы мехатроники и робототехники», которая читается магистрантам первого курса очного обучения специальности 6М072400 – Технологические машины и оборудование (траектория Мехатроника). В пособии рассматриваются общие понятия, базовые определения, основные направления и технологическое обеспечение мехатронных и робототехнических систем, а также приводится описание современных мехатронных и робототехнических модулей и систем и отражены перспективные направления в развитии мехатроники и робототехники.

**УДК 004.896(075.8)**

**ББК 32.816я73**

**ISBN 978-601-7481-60-5**

## Содержание

Введение	4
<b>1. Общие понятия о мехатронике и робототехнике</b>	<b>5</b>
1.1 Назначение и область применения мехатроники	5
1.2 Назначение и область применения робототехники	8
<b>2. Базовые определения и основные направления развития мехатроники и робототехники</b>	<b>11</b>
2.1 История развития робототехники	11
2.2 Основные понятия и определения	13
2.3 Основные направления развития мехатронных и робототехнических систем	19
2.3.1 Интеграция	19
2.3.2 Интеллектуализация	20
2.3.3 Миниатюризация	23
<b>3. Управление движением человека</b>	<b>27</b>
3.1 Постановка задачи	27
3.2 Общая схема системы управления движением человека	27
3.3 Нейроны	27
3.4 Мышцы	28
3.5 Рецепторы	30
3.6 Центральная нервная система	31
3.7 Уровни управления движением	31
3.8 Стратегический уровень управления движением	33
<b>4. ПИД-регулирование</b>	<b>36</b>
4.1 Постановка задачи	36
4.2 Пропорционально-дифференциальное управление	40
4.3 Интегральное управление	43
4.4 Пропорционально-интегрально-дифференциальное управление	44
4.5 Настройка компонент	46
4.6 Примеры использования ПИД-регулятора	47
<b>Тема 5. Проектирование средств робототехники</b>	<b>52</b>
5.1 Постановка задачи проектирования средств робототехники	52
5.2 Особенности проектирования роботов	53
5.3 Методы проектирование средств робототехники	54
<b>Список использованных источников</b>	<b>58</b>

## Введение

В настоящее время мехатроника наряду с информатикой, биоинженерией и нанотехнологиями оказывает существенное влияние на развитие производственной и бытовой техносфер в направлении все более широкого внедрения систем мехатронной автоматизации и роботизации в различные физико-технические процессы во всех сферах деятельности общества.

Целью мехатроники является создание интеллектуальных физико-технических изделий, систем и процессов, обладающих качественно новыми функциями, свойствами и возможностями. Частным случаем таких физико-технических изделий являются роботы и робототехнические системы различного назначения и размерностей.

Современная мехатроника и робототехника охватывает все размерные масштабы технических систем от «макро» до «микро» (размеры от 1 мк до 1 мм) с последующим переходом от микросистем к наносистемам (порядка ста нанометров –  $10^{-7}$  м): переход «макро-микро-нано-мехатроника и -робототехника».

**Мехатроника** – область науки и техники, основанная на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей, вычислительных устройств (ЭВМ и микропроцессоры). Мехатронная система – единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта

**Робототехника** – область науки и техники, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, построенных на базе мехатронных модулей (информационно-сенсорных, исполнительных и управляющих). Роботы и робототехнические системы предназначены для выполнения рабочих операций от микро- до макро размерностей, в том числе с заменой человека на тяжелых, утомительных и опасных работах.

## Тема 1. Общие понятия о мехатронике и робототехнике

### 1.1 Назначение и область применения мехатроники

**Мехатроника** – область науки и техники, основанная на системном объединении узлов точной механики, датчиков состояния внешней среды и самого объекта, источников энергии, исполнительных механизмов, усилителей, вычислительных устройств (ЭВМ и микропроцессоры). Мехатронная система – единый комплекс электромеханических, электрогидравлических, электронных элементов и средств вычислительной техники, между которыми осуществляется постоянный динамически меняющийся обмен энергией и информацией, объединенный общей системой автоматического управления, обладающей элементами искусственного интеллекта.

**Робототехника** – область науки и техники, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, построенных на базе мехатронных модулей (информационно-сенсорных, исполнительных и управляющих). Роботы и робототехнические системы предназначены для выполнения рабочих операций от микро- до макро размерностей, в том числе с заменой человека на тяжелых, утомительных опасных работах.

В дальнейшем будут рассмотрены и другие определения мехатроники и робототехники. В этих определениях особо подчеркивается интеграционная сущность мехатронных систем, в основу построения которых заложена идея глубокой взаимосвязи механических, электротехнических, электронных, компьютерных и информационно-измерительных компонентов, объединенных общей интеллектуальной системой управления. Все вышесказанное относится и к современной робототехнике. Поэтому наиболее распространенным графическим символом мехатроники стали три пересекающихся круга, помещенные во внешнюю оболочку «производство» – «менеджмент» – «требования рынка».

Термин «мехатроника» (*Mechatronics*) введен в 1969 г. японским инженером Тецуро Мори (фирма *Yaskawa Electric*) применительно к механическим системам с электронным управлением. Возникнув в результате второй электронной революции, мехатроника явилась ответом на запросы практики: появление и резкий подъем производства микропроцессоров и больших интегральных схем существенно расширило возможности электронных устройств управления, и позволило при малых габаритах и высокой надежности, придать им такие новые свойства, как функциональная гибкость и перестраиваемость, 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.

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» (здесь энергия выступает в качестве количественной меры движения и взаимодействия всех видов материи – механической, тепловой, электромагнитной, ядерной, плазменной, гравитационной и др.). Эти определения предполагают тесную связь мехатроники с информатикой и компьютерной техникой для обработки информации и управления: информатика составляет ее теоретическую, а компьютерная техника – техническую составляющую.

**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 рынка 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. Таким образом, понятие «движение» трактуется в данном определении функционального движения расширительно.

Большие возможности открылись перед мехатроникой в результате ее сближения с микросистемными технологиями (микроэлектро-механические 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 др.);

- транспортное машиностроение (авиакосмическая техника, автотракторное 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, микро-роботы 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.

Ради объективности необходимо все же признать, что в мехатронике еще не до конца сформулированы классификационные признаки по причине молодости этого научного направления. До сих пор мехатроника является в значительной степени уделом практиков. Разработка теоретических основ мехатроники находится в начальной стадии. Ей еще далеко, например, до такой аксиоматической науки, как теоретическая механика, хотя мехатроника и относится к группе междисциплинарных естественно-технических направлений обучения, а не к инженерной группе.

## **1.2 Назначение и область применения робототехники**

Термин «робототехника» (*Robotics*) придумал писатель К. Чапек 1920 г., а затем использовал Айзек Азимов, но само понятие робототехники имеет более долгую историю. В древнегреческой мифологии упоминается механический человек по имени Талос, которого спроектировал и изготовил бог огня и кузнечного дела Гефест.

В XVIII в. разрабатывались блистательные механические автоматы, сложное поведение которых, однако было полностью задано заранее конструктивом автомата. 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, 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:

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 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 внутрисосудистой 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 околоземном пространстве, включая наноспутники, монтажно-сборочные 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. Базовые определения и основные направления развития мехатроники и робототехники**

### **2.1 История развития робототехники**

Согласно Американскому институту по изучению роботической техники (The Robot Institute of America), робот представляет собой репрограммируемый мультифункциональный манипулятор, предназначенный для перемещения / передвижения материалов, предметов, их частей или иных специализированных устройств с целью выполнения различных задач. В словаре Вебстера (Websters' English Dictionary) робот определяется как «автономный аппарат или устройство, осуществляющий различные действия, свойственные человеку, и выполняющий их как будто под контролем человеческого разума». Вышеуказанные определения робота объединяют три основных функции – способность выполнять определенные действия, возможность решать различные задачи на запрограммированной основе, а также способность робота интерпретировать и модифицировать ответы на команды оператора.

Если обратиться к истории, то становится ясно, что с древних времен человечество пыталось использовать машины для облегчения своего труда, выполнения наиболее тяжелой работы, требуемой значительных физических усилий. Однако, в IX в до н.э, впервые роботизированное устройство было предложено для развлечения. Древнегреческий философ, математик и механик Архит Тарентский (428-347 до н.э.) спроектировал первую летающую машину - деревянную птицу, способную самостоятельно двигать крыльями при помощи пара и перемещаться на расстояние до 200 метров. Следующим шагом стало изобретение древнегреческим математиком Ктесибием Александрийским (285-222 г.г. до н.э.) в 250 году до н.э. хитроумных водяных часов, названных клепсидами, ставшими самыми точными определителями времени вплоть до изобретения в XVII веке голландским физиком Христианом Гюйгенсом маятника для поддержания незатухающих колебаний.

Великий итальянский ученый, анатом, естествоиспытатель, художник и архитектор Леонардо да Винчи (1452-1519) создал несколько так называемых манекенов, способных выполнять запрограммированные действия. В его коллекции нашлось место механическим птице и льву способному ходить, подниматься на задние лапы и даже преподнести букет лилий королю Франции. Однако, самым интересным экспонатом стал созданный в 1495 году механический манекен в форме вооруженного рыцаря, получивший название «Робот Леонардо».

В эпоху Возрождения имели место еще несколько случаев создания подобных манекенов. Наиболее знаменитыми стали женщина, играющая на лютне, созданная Джианелло Ториано в 1540 году и ребенок Пьера Жаке Дро, представленный в 1772 году. В 1801 году был предложен для применения автоматизированный ткацкий стан узорчатых материй,

способный к программированию при помощи перфокарт, сходными с картами, применявшимися для программирования ЭВМ в 1960-70-х годах. Автором данного устройства стал французский изобретатель Жозеф Мари Жаккар (1752-1834), а стан получил название «Машина Жаккара».

В 1865 году Эдвард Эллис (Edward S. Ellis) в своём историческом романе «Громадный охотник, или Паровой Человек в прериях» («The Huge Hunter, or the Steam Man of the Prairies») поведал миру об одарённом конструкторе — Джонни Брейнерде (Johnny Brainerd), который первым построил «человека, который движется на пару». Паровой Человек не был роботом в полном смысле этого слова — скорее, это был паровоз в форме человека. По свидетельствам очевидцев, первый Паровой Человек мог двигаться со скоростью до 30 миль в час (около 50 км/час), а фургон, запряжённый этим механизмом, шёл почти так же стабильно, как железнодорожный вагон. Единственным существенным недостатком была необходимость постоянно возить с собой огромное количество дров, ведь «подкармливать» Парового Человека приходилось непрерывно. Судя по всему, разбогатев и получив образование, Джонни Брейнерд хотел усовершенствовать свою разработку, но вместо этого в 1875 году продал патент Фрэнку Риду-старшему (Frank Reade). Спустя год Рид строит свою улучшенную версию Парового Человека — Steam Man Mark II. Второй «паровозочеловек» стал на пол-метра выше (3,65 метра), получил фары вместо глаз, а пепел от сгоревших дров высыпался на землю через специальные каналы в ногах. Кроме того, благодаря особой поршневой системе удалось усилить мощность обеих ног, снизить вес всей конструкции за счёт сплавов, так что скорость Mark II была существенно выше, чем у предшественника — до 50 миль в час (более 80 км/час).

Несмотря на очевидный успех второго по счёту Парового Человека, Фрэнк Рид старший, разочаровавшись в паровых двигателях в целом, оставляет затею и переключается на электрические модели. В 1898 году известнейший физик, инженер и изобретатель Никола Тесла (Nicolas Tesla, 1856-1943), в Нью-Йорке, США продемонстрировал возможность дистанционного управления устройствами при помощи сконструированной им лодки на радиоуправлении.

В современной истории впервые слово «робот» применил чешский писатель Карел Чапек (Karel Capek) в своей научно-популярной пьесе «R.U.R.» (Rossum's Universal Robots) в 1923 году. Слово «робот» происходит от чешского слова «robota», обозначающего тяжёлый физический труд. Действие пьесы происходит в недалёком будущем, где были созданы и продавались для выполнения тяжёлой работы роботы. С течением времени роботы стали высоко-интеллектуальны, приобрели способность к мышлению, принятию независимого решения, а также осознали свое ментальное и физическое превосходство над людьми. В последующем, объявив войну всей человеческой расе, роботы победили и уничтожили все живое на планете.

Айзек Азимов (Isaac Asimov) в романе «Хоровод» (Runaround, 1942) предложил для использования слово робототехника и сформулировал так называемые законы робототехники, которые стали непреложными для многих писателей.

Первые функциональные роботы появились в середине XX века. В 1954 году Джордж Девол (George Devol) и Джо Энглебергер (Joe Engleberger) разработали роботическую руку, управляемую посредством электронного контролера. Движения руки программировались и осуществлялись при помощи гидравлической системы. Данное устройство получило название «Анимэйт (Unimate)». Впервые роботическая рука была применена на конвейерах сборки автомобилей компании Дженерал Моторс (General Motors). Дальнейшее развитие устройство приобрело в 1978 году, когда Виктор Шейнман (Victor Scheinman) предложил свое изобретение под названием «Универсальная программированная рука-манипулятор» (Programmable Universal Manipulation Arm (PUMA)). Основными отличиями от предыдущей модели стали наличие большей свободы движений и способности выполнять более сложные технические задания. Более того устройство PUMA оснащалось электроприводом. Все это позволило изобретению стать эталоном промышленного робота на многие годы.

К настоящему времени функциональные роботы продолжают развиваться и уже способны не только самостоятельно передвигаться (Cart, Genghis, Shadow Biped), но и взбираться по лестницам и переносить грузы (Asimo, Honda), играть на музыкальных инструментах (Partner), изображать домашних животных (Aibo, iCybie), собирать образцы породы на Марсе (Sojourner), обеспечивать работу международной космической станции (SSRMS), а также участвовать в поиске и спасении людей в чрезвычайных ситуациях.

## **2.2 Основные понятия и определения.**

Мехатроника – это:

– «...область науки и техники, основанная на синергетическом объединении узлов точной механики с электронными, электротехническими и компьютерными компонентами, обеспечивающая проектирование и производство качественно новых модулей, систем, машин с интеллектуальным управлением их функциональными движениями» (Государственный образовательный стандарт РФ по направлению «Мехатроника и робототехника», 2000).

– «...междисциплинарная инженерная область, связанная с проектированием изделий, функции которых основаны на интеграции механических и электронных компонентов, координируемых системой управления».

– «...синергетическое сочетание точной механики, электронных систем управления и информационных технологий для проектирования, производства и эксплуатации интеллектуальных автоматических систем».

– «...новая область науки и техники, посвященная созданию и эксплуатации машин и систем с компьютерным управлением движением, которая базируется на знаниях в области механики, электроники и микропроцессорной техники, информатики и компьютерного управления движением машин и агрегатов» (Кулешов В. С. Образовательный стандарт 1995 г.).

– «...область науки о механических, энергетических и информационных процессах и их системном взаимодействии в машинах с компьютерным управлением, обеспечивающим получение новых свойств самой машины и качества исполнительных движений».

– «...область техники, обеспечивающая реализацию жизненного цикла мехатронных объектов, вплоть до интеллектуальных машин».

– «...область науки, которая сочетает основы механических, электронных и компьютерных инженерных наук».

– «...область науки, посвященная анализу исполнительных состояний мехатронных объектов и функционального взаимодействия механических, энергетических и информационных процессов между ними и с внешней средой, а также синтезу мехатронных объектов».

– «...технология, которая объединяет механику с электронными и информационными технологиями для получения, как функционального объединения, так и пространственной интеграции в компонентах, модулях, изделиях и системах».

– «...философия проектирования, которая использует синергетическую интеграцию механики, электроники и компьютерных технологий для производства качественно новых изделий, процессов и систем».

– «...метод принятия сложных решений для функционирования физических систем».

– «идеология пространственного и временного интегрирования функций в инженерных устройствах и технологических процессах».

Робототехника – это:

– «...область науки и техники, ориентированная на создание роботов и робототехнических систем, предназначенных для автоматизации сложных технологических процессов и операций, в том числе выполняемых в недетерминированных условиях, для замены человека при выполнении тяжелых, утомительных и опасных работ» (Государственный образовательный стандарт РФ по направлению «Мехатроника и робототехника», 2000).

– «...создание роботов, других средств робототехники и основанных на них технических систем и комплексов различного назначения».

– «...система универсальных автоматов для осуществления механических действий, подобных тем, которые производит человек...».

– «...универсальная механическая система, в которой распознавание и действия соединены интеллектуальными связями...».

– «...система, обладающая набором функций, объединяющим функции распознавания, действия, мышления...».

– «...техническое устройство, способное самостоятельно функционировать в неизвестных заранее, изменяющихся условиях внешнего мира...».

– «...интеллектуальная машина, выполняющая комплексные задачи в изменяющихся и неопределенных средах при минимально возможном взаимодействии с человеком-оператором (профессор Саридис Г. Н. – Saridis G. N.).

Приведенный список свидетельствует, что концептуальные идеи мехатроники и робототехники выходят далеко за рамки отдельных традиционных технических наук, таких, как «Теория механизмов и механика машин», «Теория автоматического управления», «Информационно-измерительная техника». Прародительницей мехатроники и робототехники является кибернетика – наука об управлении, которая изучает всю совокупность процессов целенаправленного изменения форм вещества, энергии и информации, протекающих в физико-технических системах. В последнее время кибернетика разделилась на два направления. Первое теоретическое направление отнесено к информации, второе к технической кибернетике. Мехатроника и робототехника объединяют оба эти направления.

Приведенные выше разносторонние определения мехатронных и робототехнических систем нуждаются, на наш взгляд, в дополнительных комментариях.

I. 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.

II. Базовыми объектами изучения мехатроники и робототехники являются мехатронные модули различного назначения. Проектирование

современных мехатронных систем основано на модульных принципах и технологиях.

Общее определение модуля: «Модуль – это унифицированная функциональная часть машины (системы), конструктивно оформленная как самостоятельное изделие или подсистема».

Понятие мехатронного модуля (ММ) формулируется следующим образом: «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:

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

Введем понятия МД и ММД.

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 моторредукторы, 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.

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.

#### Классификация мехатронных модулей

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.

III. В определении мехатронных систем подчеркнут синергетический характер интеграции разнородных элементов в мехатронных модулях и системах.

Термин «синергетика» был предложен в 70-х годах XX века немецким физиком Г. Хакеном и обозначал совместное действие и сотрудничество, направленное на достижение общей цели. Важно подчеркнуть, что синергетическое объединение (интеграция) предполагает не простое соединение отдельных частей системы, а достижение за счет объединения более высоких результатов. Практикуется конструктивное встраивание разнородных мехатронных элементов в конструкцию мехатронных модулей – создание встроенных систем.

IV. В определении мехатронных систем также декларируется необходимость интеллектуализации мехатронных и робототехнических систем в первую очередь за счет применения интеллектуальных систем управления.

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.

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 и объекты работ

Характеристики технологических сред, как правило, могут быть определены с помощью аналитико-экспериментальных исследований и методов компьютерного моделирования. При выполнении мехатронной системой заданного функционального движения объекты работ оказывают возмущающие воздействия на рабочий орган. Примерами таких воздействий могут служить силы резания для операций механообработки, контактные силы при сборке, реакция струи жидкости для гидравлической резки. В состав мехатронной машины входят четыре основные части:

- механическое устройство, конечным звеном которого является рабочий орган;
- блок приводов, включающий в себя силовые преобразователи 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 будем называть 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;

и 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 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 / или вспомогательных переходов.

Примеры рабочих органов в робототехнике: 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.

Далее необходимо заметить, что система интеллектуального управления машиной 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 Основные направления развития мехатронных и робототехнических систем**

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

### **2.3.1 Интеграция**

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 «мотор-редукторы», «мотор-колесо», где механический редуктор и колесо вместе 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 компонируются 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).

### **2.3.2 Интеллектуализация**

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

- наличие тесного информационного взаимодействия управляющих систем с реальным внешним миром и использование специально организованных информационных каналов связи;

- принципиальная открытость систем для повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения;

- наличие механизмов прогноза изменений внешнего мира и собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире;

- 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);

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

Прокомментируем смысл выделенных пяти принципов, отметив их исключительную важность с точки зрения оценки поведения интеллектуальных систем управления.

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, функционирующая 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 компенсировать увеличением числа уровней интеллектуальности, а также использованием совершенных механизмов принятия решений в условиях неопределенности в соответствующих алгоритмах управления.

И, наконец, 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. Можно уточнить теперь само понятие «интеллектуальность системы управления», а также ввести понятие «уровень» и «степень интеллектуальности».

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:

- разработка высокоскоростных аппаратных средств вычислительной техники;
- разработка специальных алгоритмов на основе современных методов и технологий обработки знаний.

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

### **2.3.3 Миниатюризация**

Переходим к рассмотрению третьего квалификационного признака развития мехатронных и робототехнических систем – миниатюризации.

Сегодня 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 микромашин 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 1–2 микрона, т. е. это – толщина шестерней, маховиков, шатунов, рычагов, собачек, храповиков, пружин и прочих составляющих механизма.

В 1994 году инженеры из университета Висконсин-Мэдисон создали микродвигатель с размером ротора 140 мкм (0,14 мм), дающий почти 150 тысяч оборотов в минуту в течение 24 часов и питающийся электростатическим электричеством.

Широкое применение MST-технологии нашли при разработке микророботов. Микророботы по внешнему виду могут быть копией макророботов, но чаще на них совершенно не похожи. По определению 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<sup>3</sup> (1 мм<sup>3</sup>). Микроробототехника теснейшим образом связана с нанотехнологиями, обеспечивая микроперемещение микрообъектов.

В настоящий момент основной проблемой в микротехнологиях и микросистемной технике является разработка единых технологических подходов к изготовлению всех подсистем. Только единый подход к производству различных по функциональному назначению и составу подсистем позволит реализовать задачи, на решение которых нацелено создание микроустройств.

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. В последние годы 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 распределенного 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.

Второй этап развития микросистемной техники стал возможен лишь с появлением таких технических решений, как сканирующие туннельные микроскопы (СТМ). Основные положения нового направления научно-технической революции были намечены в хрестоматийной речи отца нанотехнологий Ричарда Фейнмана «There's Plenty of Room at the Bottom» («Там внизу – море места»), произнесенной им в Калифорнийском технологическом институте в 1959 году. Тогда его слова казались фантастикой, потому что не существовало технологии, позволяющей оперировать отдельными атомами. Такая возможность появилась лишь в 1981 году, когда в швейцарском отделении IBM был разработан сканирующий туннельный микроскоп – прибор, чувствительный к изменениям туннельного тока между поверхностью материала и сверхтонкой иглой.

IBM, Fujitsu и Intel за последние два года потратили на нанотехнологии миллиард долларов. Нанотехнологии в основном применяются для создания особых материалов – солнцезащитных экранов, композитных материалов для автомобилей, устойчивых к загрязнению тканей, самоочищающихся оконных стекол и т. д. Уже не одно десятилетие обсуждается возможность создания самовоспроизводящихся машин.

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.

Основные исследования в данном направлении выполнялись в рамках программ «Управляемые биологические системы» и «Биоподобные системы», финансируемые агентством перспективных оборонных исследований ДАРПА министерства обороны США.

Одним из перспективных направлений современной биомикро-миниробототехники является направление, связанное с созданием роботов-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 биоминироботы 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.

В Больших успехов в области микромехатроники и нанотехнологий добились Германский институт микромеханики (созданный в рамках системы Фраунгоферовских институтов) и фирма Klocke Nanotechnik (Германия), разработавшие пьезоуправляемый двигатель (ход которого составляет несколько нанометров) для электронной микроскопии, микробиологии, микросборки, «интеллектуальный вал двигателя» и т. д.

Обобщая изложенное, можно констатировать, что мехатроника как новое научно-техническое направление символизирует и воплощает общие тенденции развития техники в XXI в. – междисциплинарную интеграцию, интеллектуализацию и миниатюризацию.

## **Тема 3. Управление движением человека.**

### **3.1 Постановка задачи**

С самого начала своего зарождения и до настоящего времени образцом для робототехники являются возможности живых организмов и, прежде всего, конечно, человека, особенно его рук. Создаваемые сегодня роботы очень далеки по своим основным характеристикам (энергетическим, информационным, по управляемости, надежности, компактности и т. д.) от объектов живой природы. Поэтому живая природа для робототехники еще долго будет служить источником идей и образцом для заимствования.

Кроме того, существует серьезная проблема создания технических средств, заменяющих отдельные подвижные части организма человека, т. е. проблема протезирования. Наконец, в ряде применений средства робототехники должны действовать в органическом единстве с человеком. В связи с этими обстоятельствами также требуется знать, как организованы движения в живой природе и как они управляются. В настоящей главе даны сведения по этому вопросу применительно прежде к человеку и его главному манипуляционному средству — руке, излагаемые с позиций современной робототехники.

### **3.2 Общая схема системы управления движением человека.**

В систему управления движениями тела человека входят пассивная часть системы - скелет, ее активная (движущая) часть - мышцы, чувствительные устройства - рецепторы и информационно-управляющая система - центральная нервная система (ЦНС). Скелет (его часть, которая участвует в движении) представляет собой вместе с мышцами объект управления в виде подвижно соединенных костных звеньев, образующих с позиций механики многосвязные кинематические цепи, подобные манипуляторам роботов.

Основное назначение этих систем управления - поддержание позы, ориентация (на объекты внешней среды), перемещение тела в пространстве - локомоции и, наконец, манипуляции.

### **3.3 Нейроны.**

Это нервные клетки, являющиеся “элементной базой” рассматриваемых систем управления. Существует много типов нейронов, специализирующихся на восприятии внешней информации, ее преобразовании, хранении, передаче и, наконец, воздействии на мышцы и железы. В организме человека миллиарды нейронов, которые соединены в нейронную сеть, охватывающую все тело.

Нейрон состоит из тела — сомы, дендритов — отростков, которые воспринимают входные воздействия от других нейронов, и аксонов — ветвящихся отростков, которые передают выходные воздействия другим нейронам и различным клеткам. Аксоны заканчиваются концевыми

утолщениями – синапсами на дендритах и теле других клеток. Длина отдельных аксонов соизмерима с размерами тела человека (например, аксоны, идущие от спинного мозга до пальцев ноги).

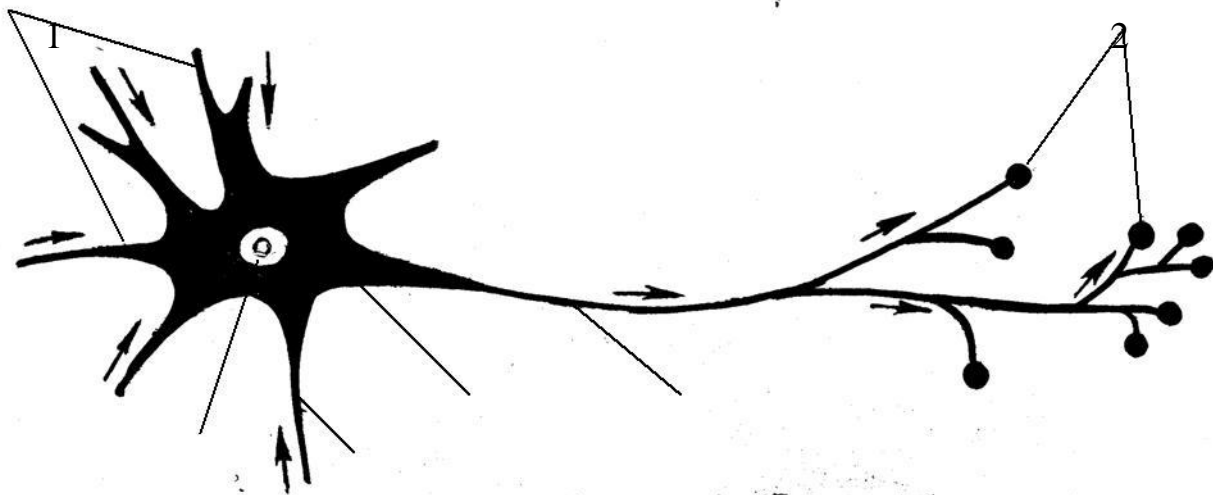


Рисунок 1 - Строение нейрона: 1 – дендриты ; 2 – синапсы; 3 – аксон; 4 – аксонный холмик; 5- синапс другой клетки; 6 – тело клетки.

Один нейрон может иметь тысячи входов от других нейронов и сотни выходов через синапсы. Возбуждение по аксону передается в виде электрических импульсов длиной примерно 1 мс со скоростью 50-100 м/с. Нейроны имеют определенный порог чувствительности, при превышении которого они возбуждаются и генерируют импульсы на выходе, которые распространяются по аксону. После этого требуется определенное время для возвращения нейрона в исходное состояние. Это так называемый рефрактерный период, в течение которого происходит химическое восстановление соответствующего аксона после проведения им очередного импульса. Нейрон может возбуждаться одним большим импульсом, который превышает порог чувствительности, или совокупностью нескольких малых импульсов, которые поступят на один или разные входы за время, меньше рефрактерного периода.

Входной сигнал воздействует на клетку, изменяя потенциал ее мембраны. При этом он может, как увеличить этот потенциал, возбуждая клетку, так и уменьшить его, осуществляя ее торможение.

Таким образом, нейрон осуществляет пространственно-временное суммирование входных сигналов, восстанавливает их интенсивность, выдавая выходные сигналы определенной интенсивности, и передает их через свои аксоны другим клеткам. Аксоны нейронов объединяются в пучки, образуя стволы или нервы.

**3.4 Мышцы.** Тело человека приводится в движение с помощью поперечнополосатых мышц. Их основу составляет так называемый анизотропный элемент (диск) в виде круглой пластинки размером в красное кровяное тельце. Под действием управляющего сигнала этот элемент резко сокращается (в течение около 1 мс). После этого для возврата в исходное состояние ему требуется примерно вдвое-втрое большее время. Таким образом, он представляет собой импульсный элемент с существенным мертвым временем.

Для создания длительного непрерывного изменения усилия соединенные в цепочку анизотропные элементы перемежаются изотропными элементами из упругой сухожильной ткани. Эти изотропные элементы играют роль амортизаторов, быстро растягиваясь при импульсном сжатии анизотропных элементов, а затем плавно возвращаясь в исходное состояние. Цепочки анизотропных и изотропных элементов образуют волокна. Из этих волокон, объединенных в пучки по 10-15 волокон, и состоит мышца.

В зависимости от быстродействия и развиваемого усилия различают три группы волокон:

быстро сокращающиеся и развивающие большое усилие, но быстро утомляющиеся волокна;

быстро сокращающиеся, но развивающие меньшее усилие, зато более выносливые волокна;

медленно сокращающиеся и развивающие небольшое усилие, но наиболее выносливые волокна.

В одном пучке могут находиться волокна разных типов. Время сокращения волокон лежит в пределах 10—200 мс, а развиваемое ими усилие – от 0,1 до 100 г.

Управление мышцей осуществляется специальными двигательными нейронами - мотонейронами. Каждому мотонейрону подчинены волокна одного типа, которые распределены по разным пучкам мышцы. Для этого к каждому пучку подходит отдельный аксон этого мотонейрона и его синапсы расположены на входящих в этот пучок волокнах данного типа. Объединенные таким образом по управлению однотипные волокна, принадлежащие одному пучку, называют двигательной единицей. В каждую двигательную единицу может входить от нескольких единиц до тысяч однотипных волокон.

Благодаря двигательным единицам, подчиненным одному мотонейрону в разных пучках мышцы, один мотонейрон может привести в действие всю мышцу, создав усилие, определяемое количеством и типом подчиненных ему волокон. При этом чем тоньше совершаемые мышцей движения, тем меньшее число волокон приходят на один мотонейрон.

Усилие, развиваемое мышцей в целом, определяется общим количеством введенных в действие волокон, а необходимая плавность движения обеспечивается путем включения в действие в ходе выполнения движения все новых волокон. Управление мышцей осуществляется сериями

импульсов следующих от мотонейронов с частотой 50-200 импульсов в секунду. В зависимости от количественного соотношения входящих в мышцу волокон разных типов получаются соответственно мышцы разного типа от быстродействующих до медленнодействующих, но более выносливых.

Таким образом, в целом, мышца - это сложного состава двигатель, состоящий из большого числа (до нескольких тысяч) параллельно включенных элементарных импульсных двигателей - волокон, «конструктивно» объединенных в пучки, а по управлению - в двигательные единицы разного типа. Требуемое изменение во времени мышечного усилия обеспечивается при этом путем последовательного включения в определенные моменты времени различного числа двигательных единиц разных типов.

Мощность, развиваемая мышцей человека при постоянном управляющем воздействии, максимальна при средних значениях силы и скорости и падает до нуля при максимальном значении каждой из этих величин. Среднее значение мощности, развиваемой мышцей человека, составляет около 20 Вт. При этом поперечнополосатая мышца - это двигатель одностороннего (неревверсивного) действия, т.е. по внешнему сигналу она может только сокращаться, создавая усилие в одном направлении. Поэтому мышцы крепятся к костям по балансной схеме, образуя пары противоположно действующих мышц-антагонистов. Когда одна из этих мышц, сокращаясь, осуществляет относительное перемещение костей в одном направлении, другая мышца растягивается, подготавливаясь к выполнению движения в противоположном направлении.

### **3.5 Рецепторы.**

Это - чувствительные устройства, подразделяемые на внешние и внутренние в соответствии с источниками собираемой ими информации. Общее количество рецепторов у человека измеряется сотнями миллионов.

Рецепторы – это чувствительные устройства, подразделяемые на внешние и внутренние в соответствии с источником собираемой ими информации. Общее количество рецепторов у человека измеряется сотнями миллионов.

Внешние рецепторы - это прежде всего пять основных органов чувств (зрение, слух, осязание, обоняние, вкус), а также множество таких рецепторов, как расположенные в коже температурные рецепторы, рецепторы давления, болевые и др. Кроме того, сюда относится вестибулярный аппарат в височной кости, который определяет положение тела в пространстве и ускорение.

Особенностью органов чувств является предварительная обработка в них информации до передачи ее в головной мозг. Внутренние рецепторы (интероцепторы) дают информацию о состоянии двигательного аппарата, а также желез и внутренних органов. Интересующие нас рецепторы первого

типа делятся на мышечные рецепторы растяжения, сухожильные и механорецепторы суставов и кожи.

Мышечные рецепторы размещены в мышце и дают информацию о длине мышцы и скорости ее изменения, сухожильные - об усилии и скорости его изменения, суставные - о значении суставного угла, скорости и ускорении его изменения.

Мышечные рецепторы устроены следующим образом. В мышце помимо основных (силовых) мышечных волокон, называемых экстрафузальными, которые были рассмотрены выше, имеются мелкие (информационные) волокна, называемые интрафузальными. Длина этих волокон изменяется вместе с экстрафузальными волокнами и измеряется с помощью расположенных в них особых рецепторов, называемых мышечными веретенами. Информация от них передается затем в спинной мозг в виде величины отклонения длины мышцы от заданного ее значения («уставки»), полученного управляющими этой мышцей мотонейронами спинного мозга. Для определения этого отклонения наряду с основными мотонейронами, называемыми  $\alpha$ -мотонейронами, имеются специальные мотонейроны –  $\gamma$ -мотонейроны, которые управляют интрафузальными волокнами по сигналам, поступающим на них одновременно с сигналами, идущими к  $\alpha$ -мотонейронам.

### **3.6 Центральная нервная система.**

Если некоторые части мозга имеют достаточно четкие границы, например, мозжечок, то другие постепенно переходят друг в друга.

Передний мозг состоит из конечного мозга и промежуточного мозга. В конечный мозг входят большие полушария, включая «новую кору», которая у человека превосходит всю остальную часть мозга и имеет толщину в 60-100 нейронов. Чтобы поместиться в черепе, она имеет складки (борозды). Соединены полушария мозолистым телом и другими нервными путями. В каждом полушарии различают четыре доли: лобную, височную, теменную и затылочную. В коре имеется сенсомоторная область, которая состоит из связанных сенсорных областей (соматосенсорной, получающей информацию от внутренних рецепторов, зрительной, слуховой и обонятельной) и моторной области.

Входящая в конечный мозг лимбическая система объединяет информацию от отдельных органов чувств и играет важную роль в поведении, направленном на выживание (питание, чувство опасности, агрессивность, размножение). Находится лимбическая система под большими полушариями перед стволom мозга, как и промежуточный мозг, через который реализуются ее сигналы.

Система управления движениями тела человека является иерархической, и в ней можно выделить следующие пять уровней управления:

- стратегический уровень (принятие решений о выполнении определенных действий на основе мотиваций);
- тактический уровень;
- три динамических уровня (исполнение движений путем управления с использованием внешней информации, рефлекторного связанного управления несколькими звеньями тела, рефлекторного управления отдельными звеньями).

### **3.7 Уровни управления движениями**

Тактический уровень управления движением.

На этом уровне составляется план достижения той очередной цели, которая определяется для него вышестоящим стратегическим уровнем управления. Отсюда этот план в виде конкретного алгоритма движений с выделением тактических подцелей и последовательности их достижения спускается для реализации на динамические уровни. Со стороны тактического уровня осуществляются непрерывный контроль и в случае необходимости оперативная корректировка заданных алгоритмов при изменении реальной ситуации. Реализуется этот уровень корой больших полушарий головного мозга (ее ассоциативными областями), т. е. в полной мере он свойствен лишь человеку и только у самых высших животных существует в зачаточном состоянии.

Тактические подцели, которые намечаются на этом уровне и под его руководством реализуются, требуют осмысленных движений. К ним относятся прежде всего движения с предметами для воздействия на внешнюю среду с целью ее изменения нужным и заранее спрогнозированным образом. Примерами подобных действий могут быть такие производственные операции с применением орудий труда, как сварка, сборка, а также вязание спицами, работа хирурга, письмо. Такими же осмысленными действиями, но без предметов являются, например, массаж и речь.

Тактический уровень - это высший уровень управления для подобных целенаправленных движений, реализующий их путем разбиения на более простые движения, которые затем уже «бездумно» исполняются нижележащими исполнительными уровнями. В зависимости от того, какая при этом необходима информация, управляющие воздействия с тактического уровня поступают на различные нижние уровни. Например, движения хирурга, поскольку требуется зрительная информация, реализуются через третий уровень динамического управления, вязание спицами, где необходима только внутренняя информация, - через второй уровень, а письмо - в значительной степени прямо через первый уровень.

До выбора тактики достижения заданной сверху цели и составления соответствующего плана действий требуется знать внешнюю обстановку и состояние организма. Для этого служат модели внешней среды и самого тела в ней, которые формируются и непрерывно корректируются на основе всей



полученной сенсорной информации. При этом для каждой конкретной цели, заданной сверху (со стратегического уровня), эти модели преобразуются, ориентируясь на эту цель путем выделения наиболее существенных для ее достижения особенностей и деталей.

В соответствии с задачами, решаемыми на этом уровне, используемая здесь, сенсорная информация предварительно перерабатывается таким образом, что содержит уже не количественные, а качественные, т. е. смысловые, характеристики объектов. Иными словами, здесь используются не метрика предметов и действий с ними (размеры, расстояния, масса и т. д.), а их топология и понятия (буква, стул и т. п.).

В моделях с переходом от непосредственных чувственных образцов к более абстрактным. В ходе составления тактического плана достижения поставленной конкретной цели его варианты «проигрываются» на модели среды и тела, а после выбора окончательного плана составляется прогнозируемая модель будущего состояния среды и тела. Когда в процессе выполнения плана возникают расхождения с прогнозом, на тактическом уровне осуществляется оперативная корректировка плана.

Выше было указано, что уровень тактического управления ответствен за целенаправленные осмысленные движения. Однако это не означает, что все такие движения осуществляются сознательно по непосредственным командам головного мозга. Как раз наоборот, для этого уровня характерно стремление к максимальной автоматизации движений на основе обучения, в том числе с помощью сознательно выполняемых упражнений и тренировок. При составлении планов выполнения очередной задачи прежде всего используется весь имеющийся в памяти врожденный и приобретенный опыт решения аналогичных задач в сходных ситуациях в виде готовых алгоритмов действий.

### **3.8 Стратегический уровень управления движением.**

Это высший уровень во всей иерархической системе управления движением. Здесь определяются цели и осуществляется контроль за реализующими их действиями, включая оперативную корректировку этих действий и самих целей в зависимости от эффективности процесса их достижения, внешних и внутренних условий. Наконец, после завершения действий здесь оцениваются достигнутые результаты. Этот уровень и сам непосредственно участвует в реализации наиболее сложных и новых движений. Примерами их являются речь, письмо.

Выбор целей поведения осуществляется исходя из потребностей с учетом сравнительной оценки их важности, степени реальности и возможного качества их удовлетворения. Потребности проявляются в виде чувств (биологических и социальных, врожденных и приобретенных, инициированных извне или возникших в самом организме - голод, опасность, продолжение рода, любопытство, свободолюбие, справедливость и т. д.).

Предельно сильным проявлением чувства являются эмоции (гнев, ужас, восторг и т. п.).

Существующие в данный момент потребности поступают в виде чувств в ассоциативные области коры больших полушарий головного мозга из лимбической системы в качестве мотиваций последующих действий. Там из них выбирается важнейшая, т. е. принимается решение о ближайшей цели поведения, которая затем реализуется через подчиненные уровни управления движением.

Процедуру выбора доминирующей мотивации можно представить следующим образом. Сигналы об отдельных потребностях вызывают из памяти в ассоциативные области коры соответствующие алгоритмы (модели действий, направленных на их удовлетворение). Последние, как и сенсорные модели, представляют собой возбужденные зоны нейронных слоев, которые отображают соответствующие управляющие воздействия на нижележащие уровни управления. Из всех этих порой противоречивых вариантов управления, возбужденные зоны которых при этом взаимно тормозят друг друга, пробивает дорогу вниз к реализации тот вариант, которому соответствует наиболее мощная, т.е. доминирующая над другими, возбужденная зона. Таким образом, выбор доминирующей мотивации осуществляется как бы голосованием нейронов ассоциативной области коры. Например, при внезапном обнаружении какой-либо серьезной опасности вызванное ею возбуждение, в том числе, возможно, сразу от нескольких органов чувств, подавит все другие потребности (чувства) и переключит действие организма на соответствующую этой новой эмоции реакцию (бежать, принять угрожающую позу и т.п.).

В течение времени, когда в ассоциативной области доминирует определенная возбужденная зона, эта зона является временным центром управления поведением организма вплоть до достижения сформированной цели, т.е. до удовлетворения соответствующей основной потребности или до подавления этого центра появившейся более обширной зоной возбуждения, требующей других действий. Критерием оптимальности при оценке степени достижения поставленной цели является чувство удовлетворения соответствующей основной потребности. На стратегическом уровне выбранная основная цель может быть разбита на отдельные подцели, которые последовательно по мере их достижения выдаются на тактический уровень как самостоятельные цели. Работа тактического уровня, как упоминалось выше, начинается каждый раз с формирования моделей среды и организма, ориентированных на спущенную очередную цель, и с высвобождения из памяти отработанных ранее соответствующих планов действий, в которых эта цель в свою очередь разбивается на более мелкие тактические подцели.

Эффективность работы стратегического уровня как наивысшего в иерархии управления действиями организма характеризует уровень его интеллекта в целом. Она определяется степенью оптимальности

принимаемых решений, степенью учета при этом различных факторов, могущих влиять на эти решения, и длительностью охватываемого периода времени. Интеллектуальные возможности организма обусловлены прежде всего объемом памяти и эффективностью ее использования. Основным свойством интеллекта является умение упорядочивать и использовать получаемую от рецепторов информацию, том числе для построения моделей внешней среды, прогнозирования ее изменений, принятия на этой основе решений и самоусовершенствования.

Завершая рассмотрение этой системы управления, еще раз обратим внимание на то, что ее нельзя сводить к простому иерархическому управлению сверху вниз, когда каждый уровень реализует порученную ему операцию путем разбиения ее на более мелкие типовые операции, находящиеся в арсенале следующего уровня, и последовательной выдачи ему соответствующих команд. Наряду с таким последовательным иерархическим процессом управления здесь, во-первых, осуществляются, как уже упоминалось, прямые воздействия сверху с пропуском отдельных промежуточных уровней, а, во-вторых, отдельные реакции организма на внешние и внутренние возмущения реализуются без участия верхнего уровня определенным промежуточным уровнем в соответствии с его специализацией. Таким образом, все уровни управления в действительности работают как последовательно, так и параллельно, дополняя и резервируя друг друга.

Основными особенностями материальной реализации рассмотренной системы являются ее многоканальность и избыточность. Выявление информации, ее обработка, запоминание и преобразование в мышечные усилия осуществляются по тысячам и миллионам параллельно действующих каналов из послойно построенных ансамблей нейронов. Эта информация носит вероятностный характер, как и состав обрабатывающих ее ансамблей нейронов, который сам определяется этой информацией. (При этом от слоя к слою каждый вид информации — зрительная, температурная и т.п.— передается тактированно с распределением ее по слою в соответствии с пространственным размещением отображаемых ею объектов в реальной среде.)

## Тема 4. ПИД-регулирование.

### 4.1 Постановка задачи

Пусть у нас имеется мобильная платформа (тележка, автомобиль), которая должна проехать из пункта А в пункт Б. Естественно, автоматически, без участия человека. Ехать она должна, скажем, по прямой. Для решения этой задачи можно "зафиксировать" рулевое управление. Или, если на тележке установлен дифференциальный привод (два мотор-редуктора), можно подавать одинаковое напряжение на оба двигателя. Однако в реальности такая система работать не будет. Рано или поздно тележка собьется с курса. Причин тому множество: и неровность покрытия дороги, и помехи, и недостаточно одинаковое напряжение питания, и вообще одинаковых моторов не бывает. Особенно задача усложнится тогда, когда надо будет ехать не по прямой, а по более замысловатой траектории.

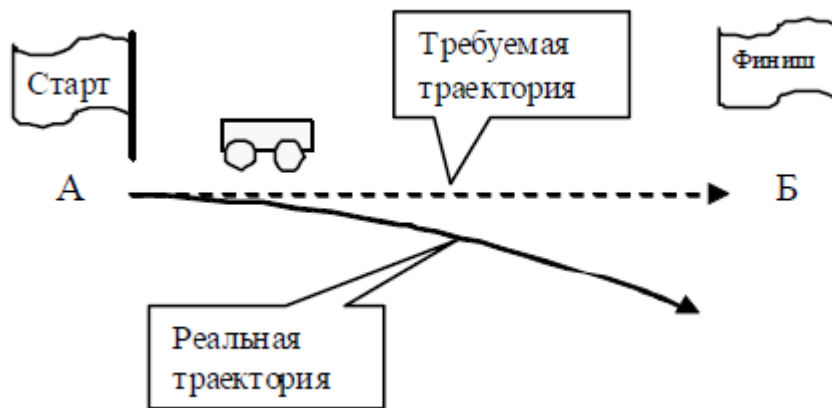


Рисунок 2 - Тележка должна проехать из пункта А в пункт Б

Как бы то ни было, для решения нашей задачи надо создавать специальную систему, управляющую движением тележки – регулятор. Построением регуляторов занимается замечательная наука – теория автоматического регулирования (ТАР), некоторые положения которой нам придется кратко изложить (да простят автора его коллеги и знакомые за упрощенчество).

#### **Терминология.**

Пусть наша платформа представляет собой тележку с дифференциальным приводом – два электрических мотор-редуктора. Отметим, что конструктив пока никакой роли не играет, он понадобится лишь в дальнейшем. На тележке установлен некий блок – источник напряжения, питающий двигатели. Собственно, то, какое питающее напряжение будет выдавать на двигатели этот блок, и будет определять характер движения тележки. Это блок вкуче с двигателями и всей ходовой частью назовем объектом управления. Наша 4 задача как раз и будет

заключаться в том, чтобы заставить блок выдавать нужное для требуемого движения тележки напряжение. На вход объекта управления мы будем подавать т.н. задающее воздействие, т.е. некий сигнал, определяющий то, что должно быть на выходе объекта управления. Это задающее воздействие обозначим как  $x_z(t)$ , а выходной сигнал обозначим через  $y(t)$ . Например, если требуется, чтобы тележка ехала прямо, то  $x_z(t)$  будет представлять собой постоянную величину. Если же надо, чтоб траектория движения тележки была иной, то  $x_z(t)$  будет представлена соответствующей функцией. Здесь  $t$ , естественно, время. Выходной сигнал  $y(t)$  будет определять то, как тележка едет на самом деле. Вообще же задача регулятора состоит в том, чтобы у нас была такая система, в которой выход  $y(t)$  соответствовал задающему воздействию  $x_z(t)$  (сказали, что надо ехать прямо – значит тележка должна ехать прямо; сказали, что надо ехать по синусоиде, - значит так и должно быть).

Теория автоматического регулирования (ТАР) – это такая дисциплина, которую конкретика задачи и устройство объекта управления не интересует. Задача ТАР – изучать информационные процессы, поэтому вместо красивых и наглядных натуральных схем и рисунков в ТАР используются схематичные изображения – структурные схемы. Мы также будем ими иногда пользоваться, тем более, что это действительно удобно

Мы уже говорили, что тележка сама по себе прямо ехать не умеет. Ей мешают всяческие неровности, неодинаковость моторов и проч. Всю эту совокупность мешающих движению факторов назовем помехами и  $z(t)$  обозначим как  $z(t)$ . На самом деле нам не столь важно, от чего конкретно произошел сбой в движении. Нам важно этот сбой как-то распознать и отреагировать на него нужным образом (откорректировать движение, т.е. значение выходного сигнала  $y(t)$ ). А для этого нам важно знать, насколько траектория движения тележки отклонилась от требуемого курса (того, что задается величиной  $x_z(t)$ ). Это отклонение называется сигналом ошибки и обозначается как  $e(t)$ .

Итак, чтобы заставить тележку ехать по заданной траектории, необходимо уметь определять ошибку в движении, вызванную помехами. Для этого можно (и нужно) оснастить тележку датчиками, которые и будут измерять отклонения от курса. Например, можно нанести на дороге линию разметки и установить на тележке датчики полосы. И тогда мы получим всем знакомую классическую задачу отслеживания линии. Сигналы от датчика полосы будут поступать на некоторый блок, называемый устройством управления. Устройство управления (УУ), получая сигнал от датчиков, определит отклонение и, в зависимости от его величины, заставит объект управления выдать соответствующий выходной сигнал. По этому сигналу тележка изменит направление своего движения, датчики определят новое положение (и новую ошибку) и все повторится сначала. Иными словами, мы получим систему с обратной связью.

Вообще, обратная связь – это краеугольный камень, основополагающий принцип ТАР, о ней мы поговорим особо. А сейчас следует заметить, что все, о чем говорилось выше – это прелюдия к "главной детали" – устройству управления. Собственно, именно созданию устройства управления (УУ) и посвящена эта статья. Обратная связь. Итак, обратная связь – это способ учета ошибок в управлении. Осуществляется она с помощью датчиков, которые эти ошибки в управлении измеряют.

Обратите внимание на тот узел, на который поступает сигнал обратной связи. Этот узел представляет собой сумматор – устройство, складывающие два сигнала: задающее воздействие  $x_3(t)$  и реальный выходной сигнал  $y(t)$ . При этом вход сигнала обратной связи помечен минусом, т.е. на устройство управления УУ поступает разность этих сигналов. Именно эта разность и представляет собой сигнал ошибки (разность между тем, что нужно и что имеется реально), на который должно реагировать УУ. Это – т.н. система с отрицательной обратной связью. Вообще, обратная связь – это особый и очень непростой вопрос. Существуют регуляторы и без обратной связи, сама обратная связь может быть и отрицательной (сигналы вычитаются), и положительной (сигналы складываются). Сами схемы управления могут быть тоже.

Для решения задачи управления мы создаем систему с обратной связью (система с замкнутой цепью воздействий или просто замкнутая система). На вход УУ поступают как внутреннее (контрольное) воздействие, так и внешнее (задающее). Управление осуществляется по сигналу ошибки  $e(t)$ :  $e(t) = x_3(t) - y(t)$

7 Типовые законы управления Настала пора разобраться с тем, каким образом устройство управления будет воздействовать на объект управления, как учитывать ошибки. Иными словами, как будет выглядеть закон управления. Вариантов таких законов (принципов) управления может быть множество. Мы рассмотрим некоторые из них. 1. Пропорциональное управление Итак, пусть наша машина отклонилась от траектории и наши датчики зафиксировали это отклонение, т.е. мы знаем сигнал ошибки  $e(t)$  – насколько мы ушли от центра линии. При этом, обратите внимание, задающее воздействие  $x_3(t)$  у нас равно 0, причем постоянно. Это может выглядеть несколько странно, однако все очень просто. Равенство  $x_3(t)$  нулю означает, что машина не должна отклоняться от центра линии. Будем считать, что датчики фиксируют местоположение машины на линии. Когда мы строго на ней, то выходной сигнал  $y(t)$  равен нулю. Отклонились влево-вправо -  $y(t)$  будет уже иным. Как бы то ни было, в каждый момент времени мы знаем величину сигнала ошибки  $e(t) = x_3(t) - y(t)$ . Теперь осталось понять, что нам с этим знанием делать, т.е. как реагировать на эту ошибку. Самый простой и естественный вариант – реагировать на нее в соответствии с ее – ошибки – значением. Сильно отклонились (ошибка велика) – будем сильно выкручивать руль (изменим скорость вращения левого или правого мотора),

отклонились чуть-чуть – и подвернем тоже слегка. Это – т.н. пропорциональный закон управления. Пропорциональное управление является самым простым в реализации и наиболее часто используется в управляющих системах. Здесь регулятор просто берет отклонение (сигнал ошибки)  $e(t)$ , умножает его на константу и выдает его в качестве управляющего воздействия  $u(t)$ . Из того, что управляющее воздействие  $u(t)$  пропорционально сигналу ошибки, следует, что в качестве регулятора можно использовать самый обыкновенный усилитель.

Здесь в качестве УУ используется простой усилитель, который усиливает сигнал ошибки в  $k_p$  раз. Мы получили т.н. П-регулятор. Такой регулятор прост (всего-навсего усилитель, причем хоть в аппаратном, хоть в программном исполнении) и он сразу же реагирует на ошибку, т.е. регулятор быстр. Примечание для сведущих. Передаточная функция П-регулятора  $W_{рег}(p) = u(p)/e(p) = k_p$ . Это – т.н. идеальное пропорциональное звено. Но все не так просто. За все надо платить. У любого решения (не только технического) есть свои положительные и отрицательные стороны. Рассмотрим их. Преимущества. Они очевидны. Это – упомянутые простота и быстродействие. Недостатки: ограниченная точность (особенно при управлении объектами с большой инерционностью и запаздыванием), перерегулирование. Если с преимуществами все достаточно ясно, то с недостатками следует разобраться особо. Качество управления Сделаем небольшое отступление от законов управления и поговорим о качестве управления. Вопрос заключается в том, каким образом мы можем судить о том, хорош регулятор или плох. Понятно, что если система управления не в состоянии удержать машину на трассе, то она плоха. Но ведь и по трассе можно ехать по-разному.

Предположим, что из-за ошибки платформа сбилась с линии. Не будем придирается к рисунку и будем считать, что платформа все-таки видит линию и пытается на нее вернуться. (Платформа нарисована целиком вне линии лишь для наглядности. В противном случае сложно рисовать).

В зависимости от величины коэффициента усилителя  $k_p$  нашего регулятора машина будет вести себя по-разному: Траектория (1).  $k_p$  велик (скажем,  $k_p = 10$ ). Система начинает совершать колебания. Причем амплитуда колебаний может быть большой. Величина максимального отклонения траектории от заданной называется перерегулированием. Чем это перерегулирование меньше, тем лучше. Траектория (2).  $k_p$  меньше (например,  $k_p = 5$ ). Система ведет себя получше. Но перерегулирование велико. Траектория (3).  $k_p = 2$ . Машина, не совершая колебаний, выходит на трассу. Это – лучшее управление. Траектория (4).  $k_p$  мало ( $k_p = 1$ ). Выход на трассу тоже осуществляется без колебаний, однако значительно медленнее. По этим примерам видно, что при пропорциональном управлении возможны неприятности: колебательность, перерегулирование и большое время переходного процесса (это время, за которое наша машина выйдет на трассу и перейдет в т.н. установившийся режим).

О качестве регулятора судят по реакции системы на единичное воздействие – специальную функцию, скачком принимающую значение, равное 1.

Мы упомянули термины установившийся и переходной режим, то рассмотрим их подробнее. Тем более что все это крайне важно для понимания сути работы системы управления. Режимы работы системы В теории автоматического регулирования различают два основных режима работы системы – установившийся режим и переходной режим. Для пояснения разницы между ними вернемся к нашему примеру с движением нашей платформы по линии. Установившийся режим – это рабочий режим системы, когда все предварительные действия закончены (мы четко выехали на трассу) и машина едет по относительно прямому участку. Переходный режим – это начало работы, когда наша машина стартует или резко меняются «дорожные условия» (резкие повороты, изломы трассы и т.п.).

Это – очень важные понятия, т.к. мы хотим иметь «хорошую», качественную систему управления. Нам очень важно, чтобы на длинных, прямых участках (установившийся режим) машина ехала максимально быстро, с минимальными отклонениями от линии, т.к. каждое отклонение увеличивает путь. Это означает, что нас здесь интересует прежде всего точность управления. Когда же мы только стартуем или начинается сложный извилистый участок (переходный режим), то здесь важнее не точность, а скорость реакции системы. Нам важнее уметь как можно быстрее реагировать на изменения трассы, чтобы не «вылететь» с нее, а уж насколько точно это получается – неважно. Конечно, «идеальная» система управления должна сочетать в себе все эти свойства – и точность, и скорость, однако на практике, как мы помним, надо быть готовым к компромиссам. Итак, пропорциональное управление просто в реализации, однако имеет склонность к перерегулированию. Последнее означает, помимо всего прочего, что на сложных извилистых участках мы будем тратить много времени на совершение колебательных движения, что чревато не только потерей скорости, но и риском вылета с трассы. Тем не менее, без П-управления нам не обойтись. 10 Функция для контроллера, реализующего П-управление, может выглядеть так: `float kp = 10; // Коэффициент пропорционального звена float Pctl(float error) { float up; up = kp*error; return up; }` Функции передается один параметр – величина сигнала ошибки error, а возвращает она значение управляющего сигнала u – величину ошибки, умноженную на коэффициент усилителя П-регулятора kp.

## 4.2 Пропорционально-дифференциальное управление

Продолжим наши рассуждения относительно качества регулятора. Очевидно, что П-регулятор не может удовлетворить все наши потребности. Представим себе ситуацию, в которой ошибка управления начинает резко возрастать. Например, мы въезжаем на участок трассы с резкими поворотами. В такой ситуации надо реагировать как-то иначе. Более



извилистый участок означает, что "крутить руль" надо более интенсивно. Более того, здесь уже не до точности управления – здесь важнее как можно быстрее отреагировать на поворот и не сойти с трассы (не потерять ее). Это означает, что надо уметь реагировать не только на ошибку управления, но и на скорость ее изменения. Нам очень важно знать не только настоящее (текущую ошибку), но и будущую ошибку (знание о скорости изменения ошибки и даст нам эту информацию). Если мы знаем, что ошибка увеличивается (это и есть скорость изменения ошибки), то надо увеличивать управляющее воздействие. Элементом, способным измерить эту скорость, является т.н. дифференциатор. Дифференциатор – это достаточно простой в реализации элемент. Его задача – умножить разность между текущим значением выходного сигнала и значением выхода в предыдущий момент времени на какой-то постоянный коэффициент:

$$ud(t) = kd*(y(t) - y(t-1))$$

Здесь  $ud(t)$  – значение управляющего сигнала,  $kd$  – постоянный коэффициент,  $y(t)$  – текущее значение выходного сигнала (в момент времени  $t$ ),  $y(t-1)$  – предыдущее значение выходного сигнала (в момент времени  $t-1$ ). Работает эта компонента (Д-компонента) достаточно очевидно. Если на выходе у нас постоянный сигнал ( $y(t)=y(t-1)$ ), то значение  $ud(t)$  равно нулю и никакого изменения не происходит. Если же что-то начинает меняться ( $y(t)\neq y(t-1)$ ), то соответственно начинает изменяться величина дифференциальной компоненты. Причем, чем больше разнятся между собой значения выходного сигнала, тем больше будет вклад этой компоненты. Отсюда, кстати, следует вывод о том, что использование одной лишь Д-компоненты в регуляторе совершенно неприемлемо. Если ошибка управления постоянна (всегда  $y(t)=y(t-1)$ ), то эта компонента никак не прореагирует на это. Поэтому Д-компонента работает в паре с пропорциональной компонентой. И тогда мы получаем следующую схему регулятора, который называется пропорционально-дифференциальным (ПД-регулятором).

Состоит из П- и Д- компонент. Здесь сигнал ошибки поступает как на пропорциональное звено (усилитель), так и на дифференцирующее звено (дифференциатор). Далее выходные сигналы этих компонент складываются, формируя управляющее воздействие  $u(t)$ . Таким образом, работа ПД-регулятора описывается следующим соотношением:  $upd(t) = up(t) + ud(t) = kp * e(t) + kd*(y(t) - y(t-1))$  Примечание для сведущих. Передаточная функция ПД-регулятора  $W_{reg}(p) = kp + kdp = kp + kdTdp$  Здесь  $Td$  – т.н. постоянная времени. Кроме того, речь здесь идет о т.н. идеальном дифференцирующем звене. У реального звена передаточная функция сложнее. Пропорционально-дифференциальный закон управления уже более интересен, нежели просто пропорциональное управление. Но есть у него и свои серьезные особенности. Обозначим пока его достоинства и недостатки. Достоинства. Этот закон управления имеет наивысшее быстродействие. ПД- регулятор реагирует не

только на величину отклонения  $e(t)$ , но, что наиболее важно, на скорость ее изменения. Недостатками ПД-регулятора являются малая точность и чувствительность к шумам. Как водится, с достоинствами все гораздо проще, чем с недостатками. О недостатках надо поговорить подробнее. Дело в том, что дифференциальная компонента управления является самой проблемной и капризной из всех типов управления. И связано это как раз с тем, что Д-компонента очень чувствительна к скорости изменения ошибки, ведь, как ни странно, не на каждую ошибку надо реагировать.

1. Проблема шумов. Дело в том, что все шумит. Шумят датчики, выдавая не всегда то, что необходимо. Шумит трасса (линия нарисована не всегда четко, имеются всякие неоднородности), шумят исполнительные схемы и механизмы. Д-компонента реагирует на все эти шумы, заставляя систему совершать ненужные действия, реагировать на то, на что реагировать вовсе не обязательно. Особенно остро эта проблема касается высокочастотных шумов. Перечисленные выше шумы относятся как раз к категории высокочастотных – они возникают на короткое время, но могут иметь большое значение. А Д-регулятор упорно будет на них реагировать. В то же время изгибы трассы относятся к низкочастотным помехам (по сравнению со скоростью процессов в системе управления), и регулятору надо бы реагировать именно на них. Выходом является установка низкочастотного фильтра на входе Д-компоненты (этот фильтр будет отсекал высокочастотные помехи), однако это уже выходит за рамки данной статьи.

2. Чувствительность к частоте сбора информации. Поскольку в ПД-законе фигурирует сигнал "в предыдущий момент времени", то очень важно, чтобы интервал времени сбора информации выдерживался как можно более строго. Если время "будет плавать", то ни о какой адекватности реакции системы речи быть не может. Считается, что временные интервалы должны выдерживаться с точностью не менее 1%. Это само по себе не так просто. При программной реализации выходом может являться использование прерываний. Именно в обработчике прерываний должна содержаться короткая (и быстрая) процедура сбора информации от датчиков. Таким образом, главная проблема ПД-регулятора заключается в том, что он усиливает шумы. И если от сильных шумов в системе не удастся избавиться, то Д-компоненту, пожалуй, лучше вовсе не использовать.

Итоги и программная реализация. Итак, пропорционально-дифференциальное управление обеспечивает наилучшее быстроедействие. Более того, благодаря тому, что ПД-регулятор реагирует не только на величину сигнала ошибки, но и на скорость его изменения, при управлении достигается эффект упреждения (прогнозирования поведения ошибки). Недостатками же ПД-закона является ограниченная точность и чувствительность к шумам. Функция для контроллера, реализующего ПД-управление, может выглядеть так: `float kp = 10;`

`// Коэффициент пропорционального звена float kd = 1;`

`// Коэффициент дифференциального звена float old_y = 0;`

```

// Предыдущее значение сигнала float PDctl(float error, float y) { float up,
ud;
// Пропорциональная компонента up = kp*error;
// Дифференциальная компонента ud = kd*(y-old_y); old_y = y; return
up+ud; }

```

Функции передается два параметра – величина сигнала ошибки error и значение выходного сигнала y. Возвращает она значение управляющего сигнала u – сумму пропорциональной и дифференциальной компонент регулятора. Глобальная (а можно сделать ее и статической) переменная old\_y служит для хранения предыдущего значения выходного сигнала.

### 4.3 Интегральное управление

Итак, основная проблема рассмотренного выше ПД-регулятора заключается в чувствительности к шумам. Можно ли сделать так, чтобы шумы сглаживались и при этом точность регулирования в установившемся режиме была максимальна? Видимо, да (и в этом прелесть риторических наводящих вопросов). Для этого можно использовать т.н. интегрирующее звено (или просто интегратор). Интегратор занимается тем, что складывает (накапливает, суммирует, интегрирует) сигнал ошибки  $e(t)$ . Управляющий сигнал  $u(t)$  в каждый момент времени пропорционален интегралу ошибки  $e(t)$ . Из этого можно сделать вывод о том, что И-регулятор реагирует на длительные отклонения управляемой величины, а кратковременные отклонения им сглаживаются.

У реального интегрирующего звена передаточная функция иная. Однако интеграция ошибок – это процесс опасный. Ошибки имеются всегда, и просто накопление их приводит к снижению стабильности системы или вообще делает систему нестабильной. Чистое И-регулирование приведет к тому, что колебания системы будут становиться все больше и больше, пока система не пойдет вразнос. Именно поэтому интегратор используется вместе с пропорциональным звеном.

Состоит из П- и И- компонент 14 Примечание для сведущих. Передаточная функция ПИ-регулятора  $W_{рег}(p) = k_p + k_i/p$  Итак, интегральное управление используется, чтобы добавить "долгосрочной точности" управлению и практически всегда используется совместно с пропорциональным управлением. Параллельное соединение двух звеньев позволяет использовать достоинства П- и И- регуляторов. Кстати, ПИ-регуляторы имеют наибольшее распространение в промышленной автоматике. Преимущества: лучшая по сравнению с П-регулятором точность в установившемся режиме, а при определенном соотношении коэффициентов  $k_p$  и  $k_i$  ПИ- регулятор обеспечивает хорошие показатели и в переходных режимах. Недостатки: худшие свойства в переходных режимах (меньшее быстроедействие и большая колебательность). Для того, чтобы система не шла вразнос из-за постоянного накопления ошибок, работу интегратора обычно ограничивают, т.е. определяют минимальное и максимальное значения

накопленного сигнала. Это обычно позволяет предотвратить т.н. "вылет системы" - неограниченный рост управляющего воздействия. Итоги и программная реализация Итак, ПИ-регулятор хорош в установившемся режиме. Он максимально точен и не реагирует на высокочастотные шумы. Правда, в переходных режимах его использование может вызвать появление колебательных процессов. К тому же он достаточно медленный. Функция для контроллера, реализующего ПИ-управление, может выглядеть так: float kp = 10; // Коэффициент пропорционального звена float ki = 0.001; // Коэффициент интегрального звена #define iMin -0.2 // Минимальное значение интегратора #define iMax 0.2 // Максимальное значение интегратора float iSum = 0; // Сумма ошибок (значение, накопленное в интеграторе) float PIctl(float error) { float up, ui; // Пропорциональная компонента up = kp\*error; // Интегральная компонента iSum = iSum+error; // Накапливаем (суммируем) if(iSum>iMax) iSum = iMax; ui = ki\*iSum; return up+ui; } Переменная iSum – это наш интегратор, который хранит сумму всех предыдущих ошибок. Величины iMin и iMax - это минимальное и максимальное разрешенные значения состояния интегратора. Они-то и ограничивают интегральное воздействие.

#### 4.4 Пропорционально-интегрально-дифференциальное управление

Осталось собрать все воедино, и мы получим, наконец, наиболее гибкий закон управления – пропорционально-интегрально-дифференциальный. Варьирование его параметров позволяет реализовывать все остальные законы. Он объединяет, естественно, все достоинства и недостатки законов, его составляющих. Каждый из элементов регулятора (пропорциональное, интегральное и дифференциальное звенья) выполняет свою задачу и оказывает свое специфическое воздействие на функционирование системы: пропорциональный закон отвечает за настоящее (реагирует на текущую ошибку), дифференциальный – за будущее (реагирует на тенденцию изменения ошибки), а интегральный – за прошлое (накапливая предыдущие ошибки и сглаживая высокочастотные шумы). Выходы этих элементов складываются между собой и формируют управляющий сигнал для устройства.

ПИД-регулятор – это старое изобретение. Он был создан еще в 1910 году, однако значительно позже, лишь в 1942 г. была разработана методика его настройки (Зиглер и Никольс). Несмотря на свою распространенность, долгое время ПИД-регулятор был достаточно сложным и дорогим устройством. Но после появления микропроцессоров в 80 - х гг. развитие и распространение (где надо и где не надо) ПИД-регуляторов стало происходить нарастающими темпами. Сейчас ПИД-регулятор относится к наиболее распространенному типу регуляторов. Считается, что почти 90% регуляторов, находящихся в настоящее время в эксплуатации, используют ПИД алгоритм. Причиной столь высокой популярности является прежде всего их низкая стоимость. Правда, в последние годы наблюдается тенденция вытеснения "классических" ПИД-регуляторов их аналогами - регуляторами,

использующих т.н. "нечеткую логику". Нечеткие регуляторы, не уступая в быстродействию, все-таки проще в настройке и более универсальны.

Итоги и программная реализация.

Функция, реализующая ПИД-управление, представляет собой простую композицию всех рассмотренных выше компонент:

```
// Параметры пропорционального звена float kp = 10;
// Коэффициент пропорционального звена
// Параметры интегратора float ki = 0.001;
// Коэффициент интегрального звена #define iMin -0.2
// Минимальное значение интегратора #define iMax 0.2
// Максимальное значение интегратора float iSum = 0;
// Сумма ошибок (значение, накопленное в интеграторе)
// Параметры дифференциатора float kd = 1;
// Коэффициент дифференциального звена float old_y = 0;
// Предыдущее значение сигнала float PIDctl(float error, float y) { float
up, ui, ud;
// Пропорциональная компонента up = kp*error;
// Интегральная компонента iSum = iSum+error;
// Накапливаем (суммируем) if(iSum>iMax) iSum = iMax; ui = ki*iSum;
// Дифференциальная компонента ud = kd*(y-old_y); old_y = y; return
up+ui+ud; }
```

Функция ПИД-регулятора действительно очень проста. Основной же проблемой при реализации ПИД-управления является настройка его параметров.

Настройка ПИД-регулятора. Общие соображения.

Настройка параметров ПИД-регулятора (коэффициентов  $k_p$ ,  $k_i$  и  $k_d$ ) – это самый сложный процесс. Эта настройка зависит от состава нашей системы, характеристик ее составных частей, от решаемой задачи. Даже одна и та же тележка должна иметь свои настройки для каждой трассы. Для извилистых трасс с резкими поворотами должна активно работать дифференциальная компонента (большой коэффициент  $k_d$ ), для трасс с плавными поворотами и прямыми участками важнее интегральная компонента. Рассмотрим, как должна выглядеть настройка коэффициентов.

1. Настройка теоретическая (как решает эту задачу математик). Для настройки необходимо нарисовать структурную схему системы. При этом необходимо знать все характеристики всех входящих в систему компонент (для сведущих: надо знать передаточные функции всех звеньев). Далее вычисляется то, что называется передаточной функцией системы. По этой передаточной функции можно определить качество переходных процессов, точность и т.п. Т.е. рассчитать коэффициенты регулятора так, чтобы наша задача решалась оптимальным образом. Это – идеальная ситуация. На практике все выглядит гораздо хуже. Основная проблема в том, мы вряд ли сможем получить адекватную математическую модель системы, вряд ли мы

учтем все нелинейности, случайности и т.п. А если учитывать и описывать все по максимуму, то мы просто погрязнем в математических расчетах.

2. Настройка инженерная (как должна решаться задача грамотным специалистом). Необходимо создать отладочный стенд, состоящий из тестового оборудования, системы его связи с компьютером, осциллографом и прочими полезными измерительными приборами. Далее следует подавать на вход системы ступенчатое воздействие (ту самую единичную функцию, которую мы как-то упоминали выше) и анализировать отклик системы. Этот отклик, называемый переходной функцией, и будет анализироваться, по нему и будут подбираться коэффициенты регулятора. Этот путь пригоден для грамотных инженеров, обладающих и познаниями в ТАУ, и временем, и оборудованием. 3. Настройка реальная (как это обычно делается). На практике (если только мы имеем дело не со специалистом в теории управления, которому все то, что здесь написано читать вовсе не нужно) все выглядит гораздо примитивнее. Коэффициенты будут определяться сугубо экспериментальным путем, используя натурные испытания. Просто-напросто, тележка будет ставиться на линию, а мы будем смотреть, как она едет. И изменять значения коэффициентов до тех пор, пока она не поедет как надо (или мы поймем, что на этой кривой трассе это убогое оборудование лучше уже не поедет).

#### **4.5 Настройка компонент**

Настройка пропорциональной компоненты

Обнулим коэффициенты  $k_i$  и  $k_d$ . Они нас пока не интересуют. Будем разбираться с  $k_p$ , варьируя его значение, скажем, от 1 до 100. Установим сначала значение  $k_p$ , равное 1. Если система очень медленно выходит на линию, то  $k_p$  надо увеличивать. Если же начинаются колебания, то  $k_p$  надо уменьшать. При этом некоторые рекомендуют следующую методику изменения значений коэффициента. Установим сначала маленькое значение  $k_p$ . Допустим, колебаний еще нет. Далее увеличиваем это значение в 10 раз, пока не начнутся колебания. Теперь уменьшаем значение коэффициента  $k_p$ , но не в 10 раз, а в 2 раза. И так до тех пор, пока колебания не прекратятся. И так далее. Т.е. мы ищем искомое значение, сначала используя большие шаги, а затем все меньшие.

Настройка интегральной компоненты Значение коэффициента интегральной компоненты  $k_i$  должно быть мало по сравнению с  $k_p$ . В качестве начального значения коэффициента  $k_i$  рекомендуется брать число от 0.0001 до 0.01. Процедура поиска (подбора) коэффициента  $k_i$  точно такая же, как и коэффициента пропорциональной составляющей (сначала большие шаги, а затем маленькие). Слишком большое значение коэффициента  $k_i$  также проявляется в появлении колебаний.

Настройка дифференциальной компоненты.

Если мы уверены, что шумы в нашей системе на слишком велики, то можно ввести и дифференциальную компоненту. Для настройки  $k_d$

установим сначала значение этого коэффициента, равное 0. Далее установим какое-нибудь небольшое значение коэффициента пропорционального звена  $k_p$  (например,  $k_p = 1$ ). Главное, что значение  $k_p$  должно быть таким, чтобы система при нулевом значении  $k_d$  не совершала колебаний. Далее установим какое-нибудь небольшое начальное значение коэффициента  $k_d$  (например,  $k_d = 0.1$ ). Будем увеличивать коэффициент  $k_d$  до тех пор, пока не станут проявляться ошибочные колебания, вызванные малыми шумами. При этом колебания от слишком большого коэффициента происходят значительно быстрее, чем колебания от недостаточного коэффициента. Рекомендуется устанавливать коэффициент в половину или четверть от того, при котором начинаются колебания от слишком большой его величины. Главное в этом процессе – вовремя убедиться в том, что поведение системы является адекватным (машина ведет себя на трассе хорошо).

### **Замечания**

Описанные процедуры настройки коэффициентов содержат много субъективизма. Главным критерием того, что мы нашли подходящие коэффициенты (не оптимальные, конечно), является внешнее поведение тележки. Но помимо таких сугубо экспериментальных подстроек, имеются и вполне объективные принципы, которые надо соблюдать при создании регулятора.

1. Скорость работы программы. Управляющая программа должна работать максимально быстро. Это означает, что необходимо использовать максимально лаконичные алгоритмы и простые операции.

2. Равномерность работы программы. Не менее важно то, чтобы формирование управляющего воздействия происходило в как можно более равномерные моменты времени. Нельзя допускать, чтобы программа "задумалась" на непредсказуемое время, т.к. в этом случае сбой дадут и интегральное, и дифференциальное звено. Для этого, повторим, можно использовать прерывания, которые гарантированно обеспечат нам равномерный сбор информации от датчиков.

3. Частота сбора данных и выполнения цикла управления. Помимо стабильности частоты сбора, необходимо определиться с тем, какова должна быть частота управления. Дело в том, что если частота управления слишком маленькая, то мы не получим эффективную систему. Более того, при малой частоте управления мы можем получить систему, которую вообще невозможно стабилизировать. Но и при слишком большой частоте мы тоже получим плохой результат: начнут возникать серьезные шумы в дифференциальной компоненте, а также начнет переполняться интегратор. Для определения частоты управления существует следующее правило: продолжительность итерации управляющего цикла должна быть между  $1/10$  и  $1/100$  желаемого времени стабилизации системы. Например, если мы хотим, чтобы система стабилизировалась за 0.1 с. (за 0.1 секунды тележка

должна устойчиво выйти на центр трассы), то частота управления должна быть от 100 до 1000 Гц (время итерации от 0.01 до 0.001 сек.).

#### 4.6 Примеры использования ПИД-регулятора

Сам по себе ПИД-регулятор достаточно прост в реализации. К тому же мы теперь знаем, как настраивать его коэффициенты. Основная проблема его использования заключается лишь в том, как научиться его использовать, т.е. включать в управление. ПИД-регулятор работает со входными величинами (сигналом ошибки и значением выходного сигнала), принимающими непрерывные значения, причем как положительные, так и отрицательные. То же касается и формируемого ПИД-регулятором управляющего воздействия. Следовательно, необходимо научиться интерпретировать сигналы от датчиков и управляющий сигнал в терминах этих величин. Рассмотрим далее ряд примеров использования ПИД-регулятора.

1. Движение вдоль стены Пусть имеется тележка, которая должна уметь двигаться вдоль стен. Для этого снабдим тележку датчиком. Для того, чтобы маршрут тележки пролегал вдоль стены на некотором расстоянии  $L$ , воспользуемся показанием датчика. Предположим, что на таком расстоянии требуемым показанием датчика будет некоторая величина  $Y$ . Именно показания датчика и будет регулируемой величиной.  
L Датчик Стена  $Y$

Сигнал ошибки  $e(t)$  также не вызывает трудностей – это просто отклонение текущего показания датчика от требуемой величины  $Y$ . Сложнее с тем, что должен представлять собой сигнал управления  $u(t)$ , точнее, как нам интерпретировать его значение, формируемое ПИД-регулятором. Пусть наша тележка использует дифференциальный привод. Это означает, что все повороты мы должны осуществлять, изменяя скорость вращения левого и правого двигателей. Будем интерпретировать сигнал  $u(t)$  следующим образом: если  $u(t) > 0$ , то будем притормаживать правый двигатель на величину, пропорциональную  $u(t)$ . Естественно, что если  $u(t) = 0$ , то тележка едет прямо (никакие двигатели не притормаживаются).

2. Движение по полосе. Метод центра масс В предыдущей задаче у нас была "хорошая" регулируемая величина – показания датчика. Фактически, мы имели дело с одним датчиком, выдающим одно число – расстояние до стены. С линией дело обстоит сложнее. Для езды по линии надо иметь датчик, позволяющий не только эту линию определить, но и сказать, насколько мы отклонились от нее. А это значит, что нужно иметь что-то вроде целой линейки датчиков освещенности. И чем больше чувствительных элементов на этой линейке, тем лучше точность измерения отклонения (один или два датчика дадут слишком грубую картину, сводящую на нет все достоинства ПИД-управления). Датчики. Метод центра масс. Пусть робот оснащен линейкой из  $n$  датчиков полосы ( $a_1, a_2, \dots, a_n$ ), расположенных на расстояниях  $x_i$  от некоторой начальной точки. Для простоты можно полагать, что датчики расположены равномерно на отрезке.



Если каждый датчик выдает сигнал  $a_i$ , соответствующий детектированию искомой полосы, то можно определить положение «центр масс», т.е. величину итогового смещения полосы относительно линейки:

$$\sum_{i=1}^n a_i x_i = \sum_{i=1}^n a_i x_i$$

Здесь  $a_i$  – аналог массы материальной точки из классической механики. Величина  $x_c$  и будет определять координаты центра определяемой линии относительно линейки. Регулируемую величину отклонения робота от центра линии  $u$  определим из следующих соображений. Пусть диапазон регулируемой величины  $u$  должен лежать в пределах  $[u_{\min}, u_{\max}]$ .

Если принять, что текущая координата  $x$  центра полосы относительно линейки датчиков находится в диапазоне  $[x_{\min}, x_{\max}]$ , то  $u_{\min} = x_{\min} - x$ ,  $u_{\max} = x_{\max} - x$ . Будем считать, что  $n$  датчиков равномерно распределены на линейке, причем координата первого датчика равна 0. Кроме того, примем, что значение управляющей величины  $u$  должно находиться в диапазоне от -1 до +1 (0 означает, что ошибка равна нулю – мы находимся строго над центром линии). Тогда для нашего случая  $u_{\min} = -1$ ,  $u_{\max} = 1$ ,  $x_{\min} = 0$ ,  $x_{\max} = n-1$ . Отсюда мы получаем простое соотношение:  $u = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}$ . Характерно, что нас не интересуют характер величины сигналов  $a_i$ . Более того, не особо критична и равномерность распределения датчиков на линейке. Все это оказывает влияние на работу регулятора (скажем, ПИД-регулятора), на вход которого и будет подаваться сигнал  $u$ . Управление. Подав на вход ПИ-регулятора вычисленное выше значение сигнала  $u$ , мы получим управляющий сигнал  $u(t)$ . Работать с ним мы будем точно так же, как и в задаче движения вдоль стены – притормаживая двигатели в зависимости от знака величины  $u(t)$  и ее абсолютного значения.

4. Управление по энкодерам Рассмотренные выше примеры были в достаточной степени умозрительными, качественными. Далее мы приведем описание более конкретного примера реализации ПИД-управления. Пример будет содержать ряд сугубо технических моментов, которые мы старательно обходили выше, чтобы не погрязнуть в деталях. Теперь же настало время обратить на эти детали внимание. Итак, пусть имеется система, состоящая из электродвигателя, драйвера двигателя и установленных на двигателе энкодеров. Разумеется, нужен еще сам контроллер. В нашем примере это будет Arduino. Рассмотрим такую простую задачу, как управление скоростью вращения двигателем, а именно – поддержание некоторой заданной постоянной скорости. Датчик скорости. Начнем с основного датчика – энкодера. Задача энкодера проста: при вращении двигателя энкодер выдает импульсы. Для этого на вал двигателя устанавливается либо магнитный датчик, либо может использоваться крыльчатка, вращение которой регистрируется оптическим датчиком. Как бы то ни было, на один оборот двигателя энкодер выдает некоторое количество импульсов  $i$ , определяя, сколько импульсов пришло за некоторый временной интервал, мы сможем определить угловую скорость вращения. Подключим выход энкодера к контроллеру, а именно к контакту №3. // Подключение энкодера #define

PIN\_encoder 3 Для того, чтобы можно было регистрировать и считать импульсы энкодера, используем обработчик прерывания. Эта процедура, которая будет вызываться всякий раз, когда возникнет такое событие, как изменение значения сигнала от датчика энкодера. Для этого напишем саму функцию-обработчик, а в функции инициализации контроллера setup() настроимся на это прерывание: // Счетчик int encoderCnt = 0; void doEncoder(void) // Системная функция. Обработчик прерывания для энкодера { static byte pred\_e = 0; byte e = digitalRead(PIN\_encoderLeft); if(e != pred\_e) { pred\_e = e; encoderCnt++; } } void setup() { ... // Настройка энкодеров pinMode(PIN\_encoder, INPUT); digitalWrite(PIN\_encoder, HIGH); // включаем подтяжку входа к «1» 22 // Настройка прерываний для энкодеров // Энкодер подключен к ноге №3 – прерывание №1 attachInterrupt(1, doEncoder, CHANGE); ... } Как видно, функция-обработчик прерывания занимается только тем, что увеличивает значения счетчика. Этого вполне достаточно. Теперь наша задача состоит в том, чтобы разобраться со временем. Временные измерения. Нам необходимо не просто считать импульсы, а определять их количество, пришедшее за некоторый временной интервал. Для этого необходима процедура, которая срабатывала бы в строго определенных моменты времени. Речь идет о создании функции обработчика прерывания от таймера. И, разумеется, необходимо настроиться на прерывание от таймера в функции setup(). // “Скорость” – количество импульсов, зарегистрированное за 0.02 сек. int RealSpeed = 0; void timerIsr() { RealSpeed = encoderCnt; encoderCnt = 0; } } void setup() { ... // Прерывания будут происходить каждые 20'000 микросекунд //(0.02 сек., или с частотой 50 Гц) Timer1.initialize(20000); Timer1.attachInterrupt( timerIsr ); // Настройка обработчика ... } Теперь в любой момент времени мы можем определить скорость вращения колеса. На самом деле, это – некая условная скорость, т.е. некоторое число импульсов, пришедшее за единицу времени (в нашем примере единица времени – это 0.02 сек.). Управление. Определимся теперь, как этой скоростью управлять. Будем считать, что мы используем некий драйвер двигателя. Для простоты будем считать, что на некоторый выход контроллера мы будем подавать сигнал управления U. Этот сигнал поступает на вход драйвера двигателя, который, в свою очередь, формирует соответствующее напряжение на выходе

С программной точки зрения управляющий сигнал представляет собой импульсы определенной скважности и частоты. Управляя скважностью импульсов, мы получаем на 23 выходе драйвера требуемое напряжение. С программной точки зрения для этого мы используем функцию analogWrite(). Второй параметр функции – это величина от 0 до 255. #define PIN\_MOTOR 6 // PWM ... analogWrite(PIN\_MOTOR, speed); ... Параметры управления. Итак, на данный момент мы можем как управлять скоростью, так и измерять скорость вращения. Важно отметить следующее. В нашей системе для имеющихся двигателей и программных настроек регулируемая скорость находится в диапазоне от 0 до примерно 20 импульсов за единицу времени.

Это – значение выходного сигнала. А значение сигнала управления находится в пределах от 0 до 255. Это, разумеется, очень условно. На самом деле двигатель начнет вращаться при достижении лишь некоторого значения напряжения. Это означает, что реальная нижняя граница сигнала управления вовсе не 0, а, скажем, 50. Запишем эти важные величины. // Диапазон скоростей float minSpeed = 0; float maxSpeed = 20; // Диапазон сигнала управления float minU = 50; float maxU = 255; Регулятор. Осталось реализовать сам ПИД-регулятор. С программной точки зрения он почти такой же, как было описано выше. // ПИД-регулятор struct TPID { float Kp; // Коэффициенты П, И и Д - звеньев float Ki; float Kd; float integral; float pred\_err; float min\_integral, float max\_integral; TPID(float Kp0, float Ki0, float Kd0, float mini, float maxi) { Kp = Kp0; Ki = Ki0; Kd = Kd0; integral = 0; pred\_err = 0; max\_integral = maxi; min\_integral = mini; } float Eval(float err); // Выход ПИД-регулятора float y2u(float y); // Вычисление управляющего воздействия }; float TPID::Eval(float err) { float y; integral = integral + err; // добавить ошибку в сумму ошибок if(integral>max\_integral) integral=max\_integral; if(integral<min\_integral) integral=min\_integral; if(integral>maxU) u = maxU; if(integral<minU) u = minU; return u; }

## Тема 5. Проектирование средств робототехники

### 5.1 Постановка задачи проектирования средств робототехники

Проектирование технических систем – это процесс создания нового изделия в виде его проекта. Проект – это совокупность технических документов, по которым изделие может изготавливаться и эксплуатироваться. Процесс проектирования стандартизирован и состоит из следующих этапов: разработка технического задания, предварительное проектирование (разработка технического предложения), эскизный проект и технический проект (разработка полного комплекта технической документации на изделие). Первые два этапа – это НИР, остальные – ОКР. Процесс проектирования изделия не заканчивается техническим проектом, а продолжается в течении всего времени его производства и эксплуатации. В течение этого времени изделие окончательно «доводится», повышается его технический уровень путем корректировки технической документации.

Порядок и методы проектирования средств робототехники регламентируются комплексом нормативно-технических документов, которые включают ГОСТы (по классификации, терминологии и обозначениям, основным параметрам, ряду грузоподъемности) и методические указания (по техническим требованиям, методам испытаний и правилам приемки, по оценке экономической эффективности). Аналогичные документы имеются и по основным компонентам роботов – устройствам управления, приводам, захватным устройствам, а также по околороботной оснастке. При разработке технических требований к роботам и последующем анализе путей их реализации необходимо исследовать взаимодействие робота с другим работающим совместно технологическим оборудованием и объектами манипулирования с целью выявления возможностей за счет достаточно несущественных их изменений заметно облегчить требования к роботу и тем самым получить общую технико-экономическую выгоду для всей системы совместно работающих машин. Наибольший технико-экономический эффект при этом может быть достигнут, когда все это оборудование проектируется одновременно с роботом.

Чаще всего это имеет место при проектировании роботов, выполняющих основные технологические операции.

Одновременно с той же целью необходимо исследовать возможности создания так называемой околороботной оснастки и других средств упорядочения и упрощения внешней среды робота.

Только после такого рассмотрения взаимодействия робота с внешней средой и оптимизации технических требований к роботу и объектам этой среды следует переходить к проектированию собственно робота. Основной принцип здесь, как и при проектировании других технических систем, в применении принципа декомпозиции, т.е. в распараллеливании всей задачи на несколько более простых подзадач. Робот, как и другие средства робототехники, состоит из двух основных функциональных частей –

исполнительных систем (манипуляторы и устройства передвижения) и устройства управления ими с сенсорикой. Последнее в свою очередь распадается на аппаратную и программную части. В соответствии с этим на первом этапе проектирования после составления функциональной схемы робота должно быть проведено его разбиение на три указанные части – механическую систему, аппаратуру управления и программное обеспечение, проектирование которых требует специалистов разного профиля. В основе решения этой задачи лежит разделение функций робота и технических требований к нему между этими тремя его взаимосвязанными частями. Эта задача неоднозначна и наиболее ответственна, поскольку ее решение в значительной степени предопределяет результат всей дальнейшей работы по созданию робота. При распределении функций робота между названными тремя его частями прежде всего выделяют функции, которые полностью или в основном определяются одной из этих частей и соответственно приписываются им. (Например, грузоподъемность и геометрия рабочей зоны определяются механической системой, параметры энергопитания и диапазон температуры внешней среды существенны в основном для аппаратуры управления, язык программирования имеет значение только для программного обеспечения.) Остальные функции необходимо оптимально распределить между частями робота на основании определенных критериев. При этом следует учитывать еще наличие взаимовлияний между некоторыми из этих функций, что дополнительно усложняет задачу и может привести к тому, что локальное улучшение характеристик одной из частей робота ухудшит эффективность робота в целом.

Например, известная взаимосвязь точности и быстродействия не позволяет независимо распределять требования к каждому из этих параметров между частями робота.

## **5.2 Особенности проектирования роботов.**

Основная особенность и сложность в проектировании роботов – это ограниченные возможности декомпозиции на автономно проектируемые части вследствие их взаимосвязанности при определении ряда основных характеристик робота и необходимости при этом системного подхода к роботу как к единому целому. Выше уже говорилось о таком системном подходе в связи с необходимостью рассмотрения робота совместно с объектами внешней среды. При проектировании первых роботов сперва создавались их исполнительные устройства, а затем для них как заданных объектов управления проектировались устройства управления. Однако в дальнейшем по мере совершенствования роботов и стремлении достижения предельно высоких их параметров исполнительные устройства и устройства управления стали проектироваться совместно как единая система на основе общих критериев. Это позволяет обеспечить оптимальное распределение технических требований к роботу между этими его частями. Характерный пример – это задача минимизации массы манипуляторов. Большие

возможности здесь дает переход от традиционного расчета механической части на жесткость с ограничением упругих деформаций звеньев к расчету только на прочность со снятием этих ограничений. Это позволяет примерно втрое уменьшить массу механической системы манипуляторов. Однако возникающая при этом гибкость конструкции и вызванная ею колебательность существенно осложняют задачу управления движением таких манипуляторов и соответственно технические требования к устройству управления.

Следствием такого системного подхода к проектированию роботов являются следующие принципы их создания:

1. Децентрализация управления вплоть до конструктивного встраивания устройств управления отдельными частями механической системы в эти части. Это позволяет удешевить всю систему в целом, повысить ее надежность и быстродействие за счет сокращения связей, распараллеливания и иерархического построения информационных процессов и процессов управления. Для таких систем разработаны различные варианты структур с сильными и со слабыми связями (распределенные системы), а также методы их проектирования.

2. Необходимость обеспечения значительно большей надежности управления, чем обычно считается приемлемым для других подобных типов объектов. Это вызвано тем, что в этих системах отказ управления, как правило, ведет к аварии всей системы.

3. Широкое применение компьютерного моделирования без чего такие сложные системы, как правило, не могут быть созданы на современном научно-техническом уровне.

### **5.3 Методы проектирования средств робототехники.**

В основе всех методов проектирования техники лежит унификация. Проектирование нового изделия – это всегда противоречивая задача для разработчика: с одной стороны существует естественное стремление использовать все последние достижения науки и техники в данной области, с другой – этому препятствуют ограничения по срокам, стоимости, материальным ресурсам и др., оговоренные обычно в технических требованиях к создаваемому изделию. Выход здесь один – это компромисс в виде оптимальной преемственности с ранее созданными подобными изделиями и их компонентами.

Основным средством для этого и является, как известно, унификация и стандартизация. Иногда в техническом задании прямо оговаривается степень (процент) унификации. Как будет показано, проблема унификации для робототехники имеет особенно большое значение.

Сфера применения робототехники быстро расширяется, постепенно охватывая все новые области человеческой деятельности. Соответственно быстро растет номенклатура роботов. Уже сегодня количество требуемых типов роботов только общепромышленного применения измеряются

сотнями. В связи с этим одной из важнейших задач робототехники являются комплексная унификация и стандартизация роботов и их компонентов. По определению международной организации по стандартизации, *стандартизация* — это установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенной области. Сюда, в частности, входит установление единиц величин, терминов и обозначений, требований к продукции, технологическим процессам, технике безопасности. К нормативно-техническим документам (НТД) по стандартизации относятся стандарты, методические указания, технические условия и т. п.

*Унификация* — это наиболее эффективный метод стандартизации, заключающийся в рациональном сокращении числа объектов одинакового функционального назначения с целью повысить производительность труда и экономичность производства и эксплуатации, улучшить качество и обеспечить взаимозаменяемость.

В робототехнике унификация развивается по трем уровням: для компонентов роботов, для собственно роботов и для роботизированных технологических комплексов. Хорошо отработанные и серийно выпускаемые унифицированные компоненты – по существу единственно возможная основа развития робототехники в условиях упомянутого выше быстрого роста номенклатуры роботов с учетом необходимости при этом оперативного создания, освоения производства и эксплуатации новых типов роботов и их модификаций.

Создание унифицированных функциональных компонентов роботов явилось первым этапом унификации в области робототехники. Ее следующим этапом стала унификация конструкции этих компонентов и программного обеспечения на основе *модульного принципа построения*. Сущность этого принципа заключается в построении механических, аппаратных и программных частей робота из более мелких унифицированных частей — модулей, которые позволяют осуществлять различные компоновки из некоторого их набора.

Система таких модулей строится по иерархическому принципу, когда более сложные модули состоят из более мелких модулей. Например, привод выполненный в виде модуля, является готовой конструктивной частью для сборки манипуляторов и устройств передвижения, приспособленной для соединения с модулями другого функционального назначения. При этом в свою очередь он состоит из ряда модулей, которые позволяют собирать различные модификации этого типа привода.

Модульный принцип построения роботов позволяет наиболее легко создавать их модификации и совершенно новые типы на базе одних и тех же конструктивных частей. При этом возникает возможность в каждом конкретном случае наиболее оптимально выбирать степень кинематической, аппаратной и программной избыточности, стоимость и распределение функции между роботом и работающим вместе с ним технологическим

оборудованием (вплоть до конструктивного объединения отдельных модулей робота с этим оборудованием).

В связи с рассматриваемым модульным построением роботов возникает вопрос: существует ли какая-нибудь альтернатива этому принципу на сегодня или в перспективе? Таким принципом может представляться идея создания универсальных очувствленных роботов. Собственно говоря, именно эта идея наиболее соответствует исходной идее робота как универсального заменителя человека. Техническая база для создания систем управления таких роботов уже имеется – это микропроцессоры, которые сами по себе представляют яркий пример реализации идеи универсального программно перестраиваемого устройства широкого применения. Однако в отличие от микроэлектроники в робототехнике в целом этот путь, по крайней мере сегодня, экономически невыгоден, поскольку стоимость роботов резко возрастает при увеличении их функциональных возможностей и грузоподъемности. Вместе с тем сейчас отчетливо прослеживается концепция перехода ко все более функционально сложным роботам с техническим зрением и интеллектуальным управлением. Саму идею модульного построения таких роботов можно трактовать как экономически наиболее оптимальный путь создания функциональной избыточности, но не в отдельном роботе, а в рамках всего арсенала унифицированных частей – модулей. Таким образом, модульный принцип построения роботов можно рассматривать не как альтернативу сверх универсальным роботам, а, наоборот, как форму реализации этой идеи, но применительно не к отдельному роботу, а ко всему их множеству.

В целом модульный подход к построению роботов дает следующие преимущества:

- резко сокращаются (до нескольких месяцев) сроки создания, освоения производства и внедрения новых марок роботов, поскольку собираются из хорошо отработанных серийных компонентов;

- возрастает технический уровень роботов, их надежность и снижается стоимость; последнее связано не только с удешевлением компонентов роботов при их серийном производстве, но и с уменьшением избыточности в конструкции и параметрах роботов благодаря тому, что появляется возможность для каждого конкретного варианта применения компоновать роботы из минимально необходимого числа простейших модулей;

- снижаются расходы на создание, производство, внедрение и эксплуатацию роботов, существенно упрощается их обслуживание;

- упрощается также задача модернизации технологических комплексов путем докомплектования входящих в них роботов новыми модулями и применения отдельных модулей в качестве самостоятельных технологических приспособлений (механические руки, кантователи, межоперационные транспортные устройства и т.д.);



- производство роботов сводится главным образом к их сборке из стандартных частей, что может быть организовано практически на любом машиностроительном производстве.

Особо большое значение для повышения технического уровня и эффективности применения роботов в технологических комплексах имеют модульные устройства управления. С их помощью удается решать проблемы управления не только самими роботами, но и такими комплексами (участками, цехами) в целом. Это позволяет резко ускорить, упростить и удешевить создание и внедрение роботов в составе технологических комплексов, что в сущности и являются конечной целью применения роботов в промышленности.

Впервые идея модульного построения роботов была сформулирована, обоснована и реализована в ЦНИИ РТК в 1980/82 годах. Здесь была создана первая система модулей для построения механической части роботов, их устройств управления и программного обеспечения. Особенно большая эффективность применения этих модулей была продемонстрирована при срочном создании для обеспечения работ по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. За 2-3 месяца было разработано и поставлено на станцию более 15 различного назначения роботов, собранных из ранее отработанных унифицированных модулей. С их помощью было обследовано более 10 000 и очищено около 5000 кв.метров территории станции. Сегодня модульный принцип построения роботов успешно используется всеми ведущими фирмами, производящими роботы, в том числе «Юнимейшен» и «Праб» (США), «Мицубиси» и «Фанук» (Япония), «Фольксваген» и «Бош» (Германия), «Сиаки» (Франция), «Оливетти» (Италия), «АСЕА» и «Электролюкс» (Швеция).

Модульный принцип построения техники нашел применение и в ряде других отраслей промышленности – в судостроении, строительстве, приборостроении. Наряду с этим принципом существуют и другие принципы построения техники, тоже основанные на идее унификации – это принцип базового изделия и агрегатного построения. Первый принцип заключается в создании гаммы (семейства) изделий, повторяющих конструкцию первоначально обработанного базового изделия, но в других габаритах и грузоподъемностях. Принцип агрегатного построения заключается в создании различного назначения и компоновок изделий из унифицированных сборочных функциональных единиц – агрегатов. (Агрегатные станки, агрегатные системы в приборостроении и вычислительной технике.) Эти оба принципа построения технических систем нашли применение и в робототехнике и могут рассматриваться как частные случаи модульного принципа.

## Список использованных источников

1. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы, применение : Учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 2012. – 256 с.
2. Теряев Е. Д., Филимонов Н. Б., Петрин К. В. Современный этап развития мехатроники и грядущая конвергенция с нанотехнологиями / Материалы 2-й Российской мультikonференции по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2012. – С. 9–21.
3. Юревич Е.И. Основы робототехники : учеб. пособие. – 3-е изд. – СПб. : БХВ – Петербург, 2010. – 368 с.
4. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Управление роботами, основы управления манипуляционными роботами : учеб. для вузов. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. – 400 с.
5. Егоров О. Д., Подураев Ю. В. Конструирование мехатронных модулей : учебник. – М. : НЦ МГТУ «СТАНКИН», 2014. – 360 с.
6. Интеллектуальные системы автоматического управления / И. М. Макарова, В. М. Лохина. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
7. Лапота В. Н., Юревич Е. И. Закономерности развития мехатроники и робототехники //Защита и безопасность. – 2011. – № 2 (45).
8. Ильясов Б. Г., Даринцев О. В., Мунасыпов Р. А. Основы микроробототехники : учеб. пособие. – Уфа : УГАТУ, 2014. – 161 с.
9. Белов А. В. Самоучитель по микропроцессорной технике. – 2-е изд. перераб. и доп. – СПб. : Наука и Техника, 2012. – 256 с.
10. Семенов Б. Ю. Микроконтроллеры MSP430 : Первое знакомство. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 128 с.
11. Норенков И. П., Кузьмик П. К. Информационная поддержка наукоемких изделий. CALS-технологии. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – 320 с.
12. Готлиб Б. М. Проектирование мехатронных систем. Ч. 1 Информационное обеспечение процесса проектирования мехатронных систем. – Екатеринбург : УрГУПС, 2010. – 115 с.