

Министерство науки и высшего образования РФ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

А.Б. Смирнов А.Н. Тимофеев

ПРОМЫШЛЕННЫЕ И СЕРВИСНЫЕ РОБОТЫ

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2019

Смирнов А.Б., Тимофеев А.Н. **Промышленные и сервисные роботы:** учеб. пособие. – СПб, 2019. – 139 с.

Учебное пособие посвящено основам робототехники. В пособии рассматриваются вопросы систематизации промышленных и сервисных роботов. Приводится анализ и классификация робототехнических систем. Подробно рассматривается сфера применения роботов и их характеристики. Приводятся сведения об основных функциональных элементах роботов. Рассматриваются сенсорные системы роботов. Даются рекомендации по проектированию манипуляторов роботов, их компоновке, выбору электродвигателей и механических передач.

Учебное пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлениям 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств, 15.03.06 – Мехатроника и робототехника.

Табл. 8. Илл. 96. Библиогр. : 68 назв.

© Смирнов А.Б., Тимофеев А.Н., 2019

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2019

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АДУ	— абсолютный датчик угла
ВТ	— вращающийся трансформатор
ДУП	— датчик углового положения
ЗУ	— захватное устройство
КА	— космический аппарат
МФЭ	— многофункциональный элемент
ОС	— орбитальная станция
ПР	— промышленный робот
РО	— рабочий орган
РТС	— робототехническая система
СР	— сервисный робот
УП	— устройство поворота
ЧС	— чрезвычайные ситуации

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 СИСТЕМАТИЗАЦИЯ РОБОТОВ.....	7
1.1 Параметры промышленных роботов.....	12
1.2 Классификация сервисных роботов.....	12
1.3 Классификация робототехнических систем космического назначения.....	15
1.4 Бионические принципы построения робототехнических систем.....	18
2 ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ.....	21
2.1 Манипуляционные системы общего назначения.....	21
2.2 Манипуляционные системы в авиастроении.....	31
3 СЕРВИСНЫЕ РОБОТЫ.....	35
3.1 Антропоморфные роботы.....	36
3.2 Мобильные роботы.....	50
4. УСТРОЙСТВА ПОВОРОТА РОБОТОВ.....	57
5 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ ПОВОРОТА....	72
5.1 Электродвигатели.....	72
5.2 Датчики устройств поворота.....	77
5.3 Механические передачи.....	101
6 ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАНИПУЛЯТОРОВ.....	105
6.1 Общие вопросы проектирования.....	105
6.2 Компоновка манипулятора.....	110
6.3 Проектирование устройств поворота звеньев манипулятора....	127
Заключение.....	134
Список литературы.....	135

ВВЕДЕНИЕ

Роботы и робототехнические системы широко используются как в промышленности так и в других сферах народного хозяйства. По ГОСТ Р ИСО 8373–2014 роботы делят на промышленные роботы (industrial robots), которые предназначены для выполнения промышленных задач по автоматизации, и сервисные или обслуживающие роботы (service robots), которые предназначены для выполнения работ, исключая промышленные задачи по автоматизации. В настоящее время все большая часть роботов используется в непроизводственной сфере, поэтому в учебном пособии им уделяется особое внимание. Они решают задачи контроля и обслуживания оборудования в экстремальных условиях, в сельском хозяйстве, медицине, науке и быту. К сервисным относятся также разнообразные специальные роботы, в том числе военные и охранные.

Сервисные роботы бывают различных масштабов. В пособии в основном рассматриваются манипуляторы средней грузоподъемности, способные развивать усилие до 300 Н на вылете 0,75 м. Максимальный радиус вылета – 1,5 м. Они могут быть востребованы в строительстве и сельском хозяйстве, в специальных робототехнических системах, а также в экстремальных условиях космоса и на объектах энергетики.

Подавляющее число современных сервисных роботов имеют только вращательные кинематические пары. В их основе лежат устройства поворота (УП) звеньев манипулятора - соединительных корпусных конструкций. УП образуются следующими функциональными элементами:

- опорами вращения;
- передачами;
- двигателями;
- датчиками момента на выходном звене;

- датчиками угла поворота выходного звена;
- датчиками угла поворота двигателя;
- механизмами проведения электрических кабелей;
- электронными блоками информационно-управляющей системы;
- несущими и соединительными конструкциями.

Возможны устройства упрощенные с усеченным составом элементов.

Обычно каждый элемент УП предназначен для выполнения одной функции. Например, опоры вращения задают положение выходного звена по трем линейным и двум угловым направлениям (компонентам). Передачи предназначены для изменения скорости и момента на выходном звене, а также для согласования взаимной компоновки (благоприятного размещения в пространстве) выходного звена и двигателя. Это примеры однофункциональных элементов. Одним из перспективных направлений минимизации габаритов, массы и стоимости манипуляторов является переход к многофункциональным элементам (МФЭ).

В учебном пособии рассматриваются пути модернизации УП звеньев манипуляторов средней грузоподъемности путём объединения механических и электронных компонентов в МФЭ. Примерами подобных робототехнических систем (РТС) являются «FRIEND» и «DEOS» (США). В России проектами наиболее близких по классу систем являются «DORES», «Робот-ГМ», «Робот-Сервис» (ЦНИИ РТК). Однако «DORES» является недостаточно грузоподъемной. А остальные отечественные разработки требуют более детальной проработки и оптимизации, так как находятся на ранних стадиях проектирования.

В рамках учебного пособия был выполнен обзор мировых тенденций и текущего уровня разработок в области создания сервисных манипуляторов общего назначения, дан анализ вариантов конструктивно-компоновочных решений перспективных УП и манипуляторов сервисных РТС.

1 СИСТЕМАТИЗАЦИЯ РОБОТОВ

Системный подход к разработке роботов и их компонентов подразумевает проведение морфологического анализа робототехнических систем. Морфологический подход представляет собой упорядоченный способ рассмотрения объекта анализа и получения систематизированной информации по всем возможным решениям изучаемой проблемы. В процессе анализа все объекты разбиваются на группы, каждая из которых подвергается тщательному изучению. Такой подход позволяет накапливать данные для последующих исследований. Морфологический подход связан со структурными взаимосвязями между объектами, явлениями и концепциями. Преимущество метода морфологического анализа состоит в том, что он осуществим при наличии малого объема информации по изучаемой проблеме.

Роботы, предназначенные для выполнения различных функций, можно классифицировать по возможности перемещаться в пространстве: их можно разделить на стационарные и нестационарные (рисунок 1). Очевидно, что стационарные роботы имеют корпус, неподвижно установленный либо на несущих конструкциях помещений или снаружи строений, либо на станинах оборудования (например, на токарных станках). Нестационарные роботы отличаются тем, что во время работы корпус робота перемещается в пространстве.

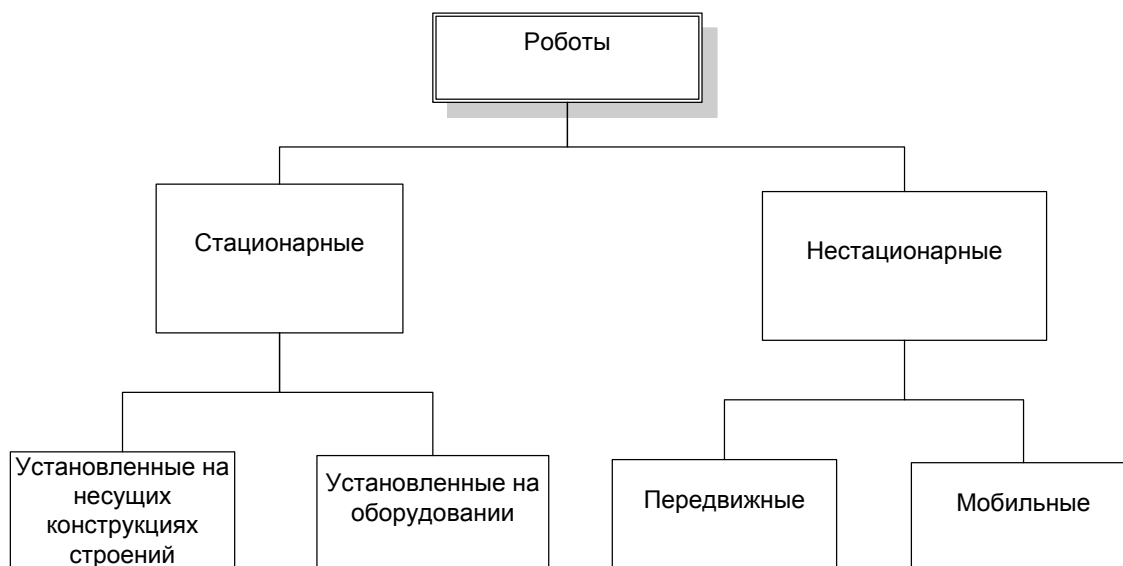


Рисунок 1– Классификация роботов по степени подвижности

Нестационарные роботы можно разделить на передвижные и мобильные. Под подвижным (или передвижным) роботом понимают любую движущуюся манипуляционную систему, перемещение которой происходит по фиксированным заранее проложенным трассам (например, направляющие, в том числе и рельсы, а также трассы: индуктивные, оптические и др.). К таким системам следует относить «передвижные промышленные роботы» (термин взят из ГОСТ 25686-86). В отраслях промышленности с детерминированными средами (например, в цехах или складах) передвижные роботы называют робокарами (robocarrier), роботрайлерами (robotrailer) или трансробами (transrob). Это – безрельсовые напольные транспортные средства без водителя. Они, как правило, предназначены для автоматической подачи заготовок или изделий в пределах технологической системы или производственного подразделения. Эти устройства перемещаются по ограниченной траектории и не подходят под определение «мобильный робот». Манипуляционный робот, установленный на робокаре, относится к манипуляционным передвижным роботам.

Под мобильными роботами (в отличие от подвижных) предлагается понимать устройства, перемещения которых производятся по неопределенной (заранее не проложенной) неограниченной траектории [1]. Мобильные роботы – это нестационарные роботы, работающие в экстремальных условиях (рисунок 2).

Экстремальные условия – это или экстремальные среды или экстремальные процессы. Понятие «экстремальные условия» предполагает неопределенность условий, в которых работает робот. Таким образом, экстремальные среды – это среды, физические и иные характеристики которых могут меняться во времени и в пространстве по закону, который не известен. Экстремальные процессы – это процессы (в которых участвует робот), характер которых заранее не известен или имеет множество вариаций.



Рисунок 2 – Классификация мобильных роботов

Под мобильными роботами (в отличие от манипуляционных подвижных роботов) понимают устройства, перемещения которых производятся по неопределенной (заранее не проложенной) неограниченной траектории.

К детерминированным средам условимся относить среды, проектируемые и создаваемые человеком (производственные, бытовые и другие помещения и здания, строительные площадки и другие сооружения). К детерминированным процессам условимся относить каждый процесс, протека-

ние и результат которого полностью зависит от целенаправленной деятельности человека (деятельности по непосредственному осуществлению процесса, управлению процессом и т.п.). К примерам использования мобильных роботов в детерминированных условиях относится, например, обслуживание атомных электростанций и других сооружений, пребывание в которых опасно для человека; обслуживание людей в быту в качестве роботов-уборщиков, роботов-сиделок и т.п.

Необходимо отметить, что для работы в недетерминированных условиях могут в подавляющем большинстве случаев использоваться только мобильные роботы. Недетерминированные условия – это или недетерминированные среды или недетерминированные процессы. К недетерминированным средам можно отнести природные среды и среды, создаваемые аварийными ситуациями, как в природных условиях, так и при разрушениях сред, спроектированных и созданных человеком, т.е. при разрушениях зданий и сооружений. К действиям робота в природных средах относятся действия при горных разработках, полевых сельскохозяйственных работах, лесопосадках, разведке на местности, подводных и подземных работах, в космосе, на поверхности планет и астероидов, при определениях радиоактивной зараженности местности, военных действиях при разминировании и патрулировании, обслуживании слепых в качестве поводырей на улице и т.п. К действиям робота при разрушениях созданных человеком сред относятся действия по расчистке завалов, спасательных работах в разрушенных сооружениях и т.п.

К недетерминированным процессам условимся относить каждый процесс, протекание и результат которого не зависит полностью от целенаправленной деятельности человека. Недетерминированными процессами являются все природные процессы на Земле (землетрясения, извержения вулканов и т.п.), а также в космосе, на планетах и астероидах при бомбардировке метеоритов, пожары, взрывы. В [1] к недетерминированным процессам автор относит уборку сельскохозяйственных продуктов, прополку и т.п.

Мобильные роботы по функциям можно разделить следующим образом (рисунок 3). Мобильные транспортные роботы – мобильные роботы, которые служат для доставки грузов. Они имитируют локомоционные функции ног человека или конечностей животных и являются интеллектуальными транспортными средствами.

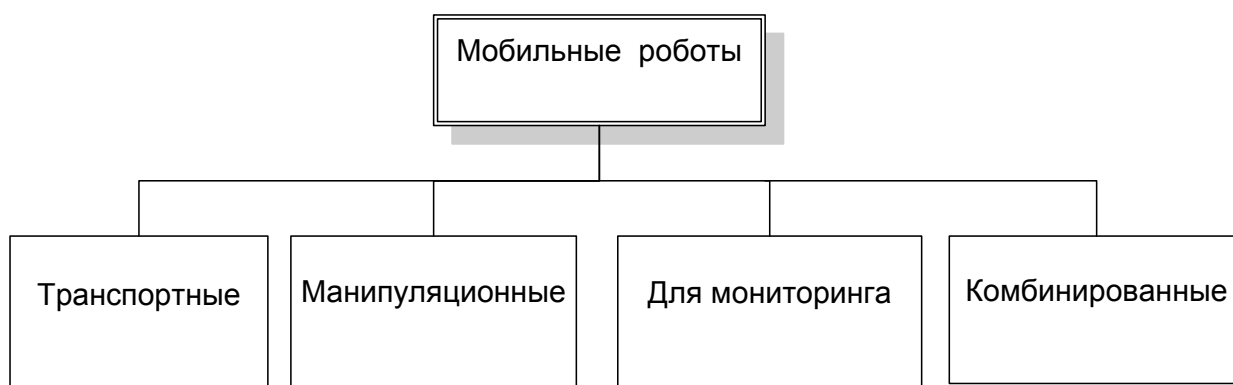


Рисунок 3 – Классификация мобильных роботов по функциям

Мобильные манипуляционные роботы - мобильные роботы, несущие на себе манипуляторы. Они имитируют локомоционные функции, как ног, так и манипуляционные функции рук человека. Мобильные роботы, предназначенные для мониторинга, кроме осуществления локомоционных функций выполняют функции измерения параметров окружающей среды (например, осуществляют замеры радиации, химического состава атмосферы, давления и т.п.). Очевидно, что мобильные комбинированные роботы осуществляют функции трех предыдущих типов роботов. Например, робот для мониторинга, осуществляющий замеры проб грунта, будет комбинированным, т.к. для забора грунта необходимы функции манипулирования с объектом исследования.

1.1 Параметры промышленных роботов

По величине грузоподъемности промышленные роботы (ПР) разделяют на сверхлегкие (до 1 кг), легкие (от 1 до 10 кг), средние (от 10 до 200 кг), тя-

желые (от 200 до 1000 кг), сверхтяжелые (свыше 1000 кг). В настоящее время выпускается до 73 % моделей ПР легкого и среднего типа с грузоподъемностью от 5 до 80 кг.

По степени подвижности ПР подразделяют на три группы: малую (до трех степеней подвижности); среднюю (4-6 степеней подвижности) и высокую подвижность (свыше шести степеней). Число степеней подвижности ПР в значительной мере определяет его универсальность. Современные ПР имеют обычно от двух до семи степеней подвижности: самые простые – две; наиболее сложные – семь, иногда и более. В структуре современного мирового парка ПР преобладают конструкции с четырьмя и пятью степенями подвижности (67 %).

По величине обслуживаемого рабочего объема все роботы можно разделить на пять классов. Наибольшее распространение в настоящее время получили средние ПР (45 %), на втором месте малые (30 %), затем крупные (12 %), мини-роботы (9 %) и, наконец, микророботы (4 %), в котором может находиться исполнительное устройство ПР при его функционировании. Величина обслуживаемого рабочего объема определяется без учета габаритных размеров объекта манипулирования.

1.2 Классификация сервисных роботов

Все роботы по функциональному назначению можно разделить на промышленные роботы (ПР) и сервисные роботы (СР).

Рассмотрим более подробно СР с точки зрения области применения. Роботы этого типа применяются:

- в сфере услуг;
- в военной сфере и сфере чрезвычайных ситуаций (ЧС);
- в сфере космического применения.

СР, применяемые в сфере услуг, можно разделить по использованию в следующих областях деятельности человека:

- для использования в домашнем хозяйстве;
- для использования в сфере торговли общественного питания;
- для использования в медицинских учреждениях;
- для использования в общественных заведениях;
- для использования в городском хозяйстве;
- в сельском хозяйстве.

Различия указанных видов деятельности накладывает свои требования по мощности и габаритам СР, по удобству и простоте эксплуатации, по стоимости, по надежности, по гигиеническим требованиям.

По функциям СР можно разделить на следующие категории:

- роботы-мойщики-уборщики (окон, помещений, бассейнов, улиц);
- роботы-пылесосы (квартир, общественных помещений, улиц);
- роботы-газонокосильщики;
- роботы-сторожа;
- роботы-официанты;
- роботы-игрушки;
- роботы-массажеры;
- роботы-хирурги;
- роботы по обслуживанию лежачих больных.

В военной сфере и сфере ЧС также СР имеют различия с точки зрения зоны (пространства) функционирования. СР по зоне служебной деятельности военнослужащих и служащих МЧС различают по использованию:

- на суше;
- на поверхности воды и в толще воды;
- в воздухе.

По функциям СР, применяемые в военном деле и сфере ЧС, можно разделить на следующие группы:

- роботы-разведчики (мониторинг среды);
- роботы-спасатели;

- роботы-саперы;
- роботы-пожарные;
- боевые роботы;
- роботы-доставщики грузов.

СР в сфере космического применения можно разделить по использованию в следующих зонах деятельности космонавта:

- внутри космического аппарата (КА) и орбитальной станции (ОС);
- в зоне около КА и ОС;
- автономное функционирование вдали от КА и ОС;
- на космических телах и планетах.

В основном потребность в применении СР в сельском хозяйстве возникает в период уборки урожая, когда необходимо сделать большой объем работ за короткое время. Индустрия сельского хозяйства отстает в использовании СР от других отраслей, так как виды работ, сопряжённые с сельским хозяйством, во многом не детерминированы, и часто повторяющиеся задачи каждый раз не совсем те же самые. В большинстве случаев множество факторов (например, размер и цвет собираемых плодов) должны быть рассмотрены до начала выполнения задачи. Роботы могут быть использованы для других растениеводческих задач, таких как обрезка, прополка/пахота, орошение и мониторинг. СР можно использовать в животноводстве в целях доения, мойки и стрижки. Задачи по созданию таких роботов часто аналогичны задачам по созданию мобильных роботов для работы на космических телах и планетах.

Классификация сельскохозяйственных СР по функциям:

- роботы-сборщики фруктов, ягод и овощей;
- роботы для прополки грядок и обрезки растений;
- роботы для сева и посадки растений;
- роботы для пахоты;
- роботы для мониторинга состояния растений и почвы;

- роботы для внесения удобрений и полива;
- роботы для дойки;
- роботы для мойки и стрижки животных.

1.3 Классификация РТС космического назначения

С целью систематизации описания робототехнических систем (РТС), их сравнительного анализа, обоснования выбора состава РТС и основных принципиальных решений введем классификацию РТС космического назначения по ряду пересекающихся признаков.

По области применения РТС подразделяются на планетарные и корабельные:

- планетарные – для работы:
 - 1) на планетах и спутниках (Луна, Марс);
 - 2) на астероидах;
 - 3) на других космических телах;
- корабельные – для работы:
 - 1) на всей или значительной части наружной поверхности КА (в частности, ОС);
 - 2) на наружной поверхности КА вблизи шлюзов;
 - 3) на наружной поверхности ОС вблизи агрегатов стыковки (причаливания или хранения пилотируемых кораблей);
 - 4) на существующих или строящихся конструкциях ОС в виде ферм;
 - 5) во внутренних помещениях КА;
 - 6) на автоматических спутниках Земли и «космическом мусоре».

По месту установки корабельные РТС делятся на:

- мобильные, перемещающиеся:
 - 1) по наружной поверхности КА;
 - 2) по конструкциям ОС в виде ферм;

3) внутри КА;

- стационарные, установленные на:

1) наружной поверхности КА вблизи шлюзов;

2) наружной поверхности КА вблизи агрегата стыковки.

По размерам (расстоянию между центрами аналогов сферических шарниров плеча и кисти) манипуляторы подразделяются на:

- малые манипуляторы — менее 0,8 м;

- средние (близкие по размерам к руке человека) — от 0,8 м до 1,4 м;

- большие (кранового типа, грузовые) — от 1,4 м до 15 м.

По виду кинематико-компоновочной схемы манипуляторы подразделяются на:

- упрощенные 2 – 3-степенные;

- техногенной компоновки (6 – 7-степенные);

- антропоморфной компоновки (6 – 7-степенные);

- змеевидной компоновки (6-ти и более степенные).

По методам и средствам перемещения мобильные РТС подразделяются на:

- перемещаемые грузовым манипулятором (кранового типа);

- перемещающиеся перешагиванием:

1) по базовым точкам КА, полностью приспособленным для взаимодействия с РТС;

2) по элементам конструкции КА, частично адаптированным для взаимодействия с РТС;

3) по элементам конструкции КА, не приспособленным для взаимодействия с РТС;

- перемещающиеся качением по направляющим (рельсам), установленным на КА;

- перемещающиеся на тросовых растяжках;

- перемещающиеся при помощи реактивных двигателей.

По наличию сменных РО РТС подразделяются на:

- РТС с универсальными РО;
- РТС со сменными специализированными РО.

По видам средств смены РО РТС подразделяются на:

- РТС с несколькими специальными манипуляторами, каждый из которых несет свой вид постоянно установленного РО;
- РТС с механизмами смены РО без реконфигурации структуры РТС;
- РТС с механизмами смены РО с реконфигурацией структуры – разрывам связей между элементами и установлением новых связей.

По виду РО, расположенных на конечных звеньях манипуляторов, РТС подразделяются на:

- РТС с РО манипуляторов в виде захватного устройства;
- РТС с РО манипуляторов в виде унифицированного стыковочного устройства.

По степени реконфигурации структуры систем, образованных из манипуляторов, РТС подразделяются на:

- системы со стационарно установленными манипуляторами на корпусе РТС или КА;
- системы в виде реконфигурируемых агрегатов из манипуляторов (прежние связи между манипуляторами и/или корпусом РТС или КА разрываются и устанавливаются новые).

РТС подразделяются по количеству входящих в них полных (6 – 7-степенных) манипуляторов: от 1 до 6 и более. По виду взаимосвязей между манипуляторами образованные из них РТС подразделяются на:

- РТС в виде последовательной цепи манипуляторов;
- РТС с манипуляторами, параллельно установленными на общем корпусе (узле);
- РТС со смешанным (последовательно-параллельным) соединением манипуляторов;

- РТС в виде группы автономных манипуляторов;
- стационарных;
- мобильных агрегируемых (собираемых вместе);
- мобильных не агрегируемых.

В общем случае мобильные РТС в состоянии работать в любой точке на наружной поверхности КА, за исключением отдельных зон, занятых выступающим оборудованием, например, солнечными батареями или антеннами. Альтернативным решением является установка стационарных специальных манипуляторов рядом со шлюзом или агрегата стыковки. Выбор размещения и структуры РТС определяется возможностью создания универсальной РТС с требуемыми техническими характеристиками.

Более детально различные представители рассмотренных систем рассматриваются в следующих разделах.

1.4 Бионические принципы построения РТС

Многие живые организмы так же, как и РТС, манипулируют объектами и перемещаются в неупорядоченной окружающей среде. При создании РТС часто оказывается полезным заимствовать те или иные концептуальные и схемные решения у биологических аналогов со сходными функциями. Технические устройства, имеющие вид, сходный с биологическими объектами, принято называть биоморфными (от греч. *morphe* — вид). Возможны следующие разновидности подобия живых существ и робототехнических объектов:

- структурное подобие — сходность состава и взаимосвязей основных функциональных подсистем: двигательной, управленческой, сенсорной, энергообеспечения, терморегулирования;

- геометрическое подобие — сходность внешнего вида и размеров или пропорций между основными компоновочными элементами;

- кинематическое подобие — сходность состава основных звеньев, их возможных траекторий и, в некоторых случаях, скоростей;

- статическое подобие — сходность развиваемых сил и моментов.

Структурное подобие носит концептуальный характер. Большинство РТС по своей структуре сходно с живыми организмами, так как, функционируя примерно в тех же внешних условиях, они сталкиваются с теми же внешними ограничениями (или частью их), что и живые организмы.

Робототехнические системы бывают сходными с различными видами живых существ. Практический интерес представляет подобие роботов:

- человеку — антропоморфность;
- приматам — приматоморфность;
- насекомым — инсектоморфность;
- змеям — серпентоморфность.

Для начала рассмотрим «приматоморфные» роботы, содержащие четыре многоцелевых манипулятора — аналога передних и задних лап приматов, телевизионную систему — аналог головы, и корпус (как вариант, с устройством крепления на КА). Технологические операции, например, сборочные, выполняются одной парой манипуляторов. Вторая пара манипуляторов (совместно с устройством крепления на корпусе) используется для удержания робота на конструктивных элементах КА. «Приматоморфные» роботы востребованы только при перемещении по конструкциям, произвольно расположенным и плохо приспособленным для захвата, где малая надежность крепления компенсируется количеством одновременно закрепленных устройств.

Еще более сложными являются «инсектоморфные» роботы, содержащие шесть или более манипуляторов — аналогов лапок насекомых, — телевизионную систему — аналог головы — и корпус. Они могут оказаться полезными для передвижения по особо слабым конструкциям, например, в виде сетки из композиционных материалов.

«Серпентоморфные» роботы образуются последовательной, относительно длинной (порядка 15 – 30) цепью звеньев, связанных шарнирами. Такие роботы могут оказаться востребованными для обследования тесных извилистых полостей в конструкциях КА.

Однако чаще всего рассматривается подобие роботов человеку. При этом речь уже идет о стремлении разработчиков обеспечить либо три вида подобия человеку (структурное, геометрическое, кинематическое), либо все четыре, включая статическое. Поскольку с технической точки зрения целесообразность такого стремления (имеющего в своей основе, в первую очередь, ориентацию на массовый, непрофессиональный идеал «робота») сомнительна, рассмотрим аргументы за и против.

Целесообразность антропоморфного построения РТС космического назначения обосновывается следующими аргументами:

- космические аппараты приспособлены для человека, его обитания и работы. Поэтому чем более РТС будет подобна человеку, тем ниже вероятность ее несовместимости с техногенной средой. Или иначе, меньше требуется модифицировать конструкцию КА для обеспечения возможности использования на нем РТС;

- задачи, стоящие перед РТС на КА, разнообразны, зачастую непредсказуемы, и поэтому, вместо того, чтобы четко сформулировать технические требования к РТС, проще потребовать совпадение РТС по возможностям с человеком;

- подобие человеку является одним из требований при реализации управления прямым копированием движений человека на основе визуального измерения положения специальных меток на одежде или задающего органа управления в виде экзоскелета.

Эти аргументы заслуживают внимания. Но степень подобия робота человеку должна быть обоснована, оптимальна по заданным критериями и ни в коем случае не должна переходить границы разумности.

2 ПРОМЫШЛЕННЫЕ РОБОТЫ

2.1 Манипуляционные системы общего назначения

Минпромторгом Российской Федерации (РФ) разработана стратегическая программа технологической модернизации «Промышленный и технологический форсайт Российской Федерации на долгосрочную перспективу» [2], в которой большое внимание уделяется развитию робототехники. В частности, в ней говорится:

«...Именно в парадигме моделирования роботов, т.е. сложных интеллектуальных производственных комплексов сейчас развивается все мировое станкостроение и точное приборостроение. Компания Microsoft прогнозирует утроение рынка робототехники к 2025 году. Основная доля применения роботов будет применена в бытовом обслуживании населения (более 30 млрд. долл.), объем рынка промышленных роботов составит 12 млрд. долл. Роботизация производств, в частности, обеспечивает реиндустриализацию стран с дорогой рабочей силой (производства возвращаются в крупнейшие городские агломерации развитых стран).

Формирование с помощью роботов более гибких производственных схем приводит к технологическому «сближению» и выходу на качественно новый уровень ранее разделенных секторов – авиации, автомобилестроения и судостроения, химических производств, биотехнологий и фармацевтики и пр.

Основным потребителем промышленных роботов в мире сейчас выступают автомобильная промышленность (около 20 тыс. ед. или треть всех поставок в 2015 году), электронное и электрическое оборудование (18 %), химическая промышленность (10 %) и металлургия (5 %). Соответственно, наибольшее число роботов в расчете на 10 тыс. занятых приходится на автомобильное производство (400–700 ед.), химическую промышленность (200–400 ед.) и производство электронного и электрического оборудования (100–200 ед.). Мировой рынок промышленных роботов в 2009 году оценивался на

уровне 3,8 млрд. долл. (падение на 40 % по сравнению с 2008 годом из-за тяжелых последствий финансово-экономического кризиса для автомобильной промышленности). Ожидается, что к 2020 году объем рынка достигнет 140 тыс. ед.»

Рынок роботов в зависимости от их назначения в современном индустриальном обществе очень широк. В РФ в XXI веке производство ПР развито слабо. С начала 90-х годов и по сей день в РФ существует только одно производство ПР – это специализированный завод «Волжский машиностроительный завод» на территории "Автоваза". По лицензии ранее и сейчас собирают три модели роботов фирмы KUKA Robotics (модели ПР 125/150/200), а также роботы TUR 15/30/150. Общий объем производства небольшой – одна-две сотни единиц в год. Большинство этих роботов поступает на сам "Автоваз", где их основное назначение – точечно-контактная сварка и сборочные операции. Попытки структур АвтоВАЗа спроектировать и наладить производство промышленных роботов не принесли государству массового уровня внедрения продукта. Поэтому Россия по-прежнему вынуждена импортировать робототехнику из Европы и Японии. [3].

В последнее время в России планируется освоить производство отечественных ПР. В московском технопарке "Мосгормаш" российская компания Aripix Robotics и Центр промышленной кооперации запустят серийное производство промышленных роботов-манипуляторов в 2020 году [4].

Директор по развитию Международного холдинга «Белфингрупп» А.В. Филиппович в своем интервью говорит: «Сегодня, примерно 95 % всех запросов в РФ по внедрению роботов, связаны с желанием модернизировать сварочные процессы. Например, в развитых странах роботизация сварочных процессов, в среднем, занимает всего 15 % от общей массы, зато наблюдается большой спрос по внедрению роботов для автоматизации паллетирования, обслуживания станков, в том числе листогибочных и прессовых машин. Так же в Европе существует высокий спрос на технологии роботизированной 3D-

резки, покраски и механообработки. Отдельно стоит упомянуть о вредных производствах, где трудятся исключительно роботы, а не люди».

Вот некоторые цифры за 2007 год: в России внедрено всего 180 промышленных роботов в составе роботизированных комплексов для решения различных задач по автоматизации производственных процессов; общее количество промышленных роботов поставленных на территорию России составляет около 8000 единиц, 95% из них были поставлены в период существования СССР, и многие из них уже списаны.

В последнее время наблюдается существенный рост ПР в России. В 2015 г. введено в эксплуатацию 340 ПР. В 2015 и 2016 годах закуплено 866 ПР.

В 2017 году в США внедрено 34 000 промышленных роботов, общий парк промышленных роботов в США, насчитывает 240 000 единиц; году Европейский Союз внедрил 43 000 промышленных роботов, при этом общий парк составлял 380 000 единиц; в 2007 году Япония внедрила 58 600 промышленных роботов, общий парк промышленных роботов в Японии составлял на тот период 540 000 шт. Последние прогнозы Международной федерации робототехники сводятся к тому, что к 2020 году объем рынка робототехники будет оцениваться в 500 млрд. долларов США.

Как отмечается в отраслевом бюллетене, опубликованном Шэньянским институтом автоматизации при Академии наук Китая, в 2001 году в Китае использовались лишь 3500 промышленных роботов, а ежегодная потребность в роботах в годы 9-й пятилетки /1996 - 2000 гг/ возросла на 30 процентов. Как предполагают специалисты, в 2020 году потребность в роботах в Китае превысит 100 000 единиц. В настоящее время Китай активно принимает меры по поддержке развития отрасли производства роботов. В этом году в Шэньяне создан технопарк машиностроения, в котором базируется четыре роботопроизводственных предприятия, включая компанию "Синьсун". Этот

технопарк в сути превратился в один из крупных заводов по изготовлению роботов Китая».

В журнале [5] приведена диаграмма, показывающая состояние робототехники на Западе без учета Кореи и Японии (рисунок 4).

Примечательно, что в ней не фигурирует количество выпускаемых роботов, а оценивается прибыль от продаж ПР. В лидерах компании KUKA, ELEKTA, ECA ROBOTICS, QINETIQ, GEA GRUP, ROBOMOP. Общая прибыль превышает 16 млрд. долл.

Пионерами роботизации в XX веке были США и Франция, но сейчас их промышленность автоматизирована лишь на треть от уровня Кореи и Японии. Япония и Корея – мировые лидеры по использованию роботов.

В [6] приведены данные по использованию ПР в различных странах (рисунок 5). Анализ приведенных данных показывает, что Россия по использованию ПР стоит на уровне Бразилии и Индии – стран, в которых велико количество низкооплачиваемых работников, занятых ручным трудом, и эти страны не имеют большой заинтересованности во внедрении ПР. С другой стороны, приведенные данные о количестве ПР существенно отличаются друг от друга в разных источниках информации. Однако тенденция ясна – робототехника приносит прибыли за счет расширения областей использования ПР и иных роботов. Использование ПР в новых областях становится возможным при помощи усложнения манипуляционных возможностей, применения систем технического зрения и искусственного интеллекта.

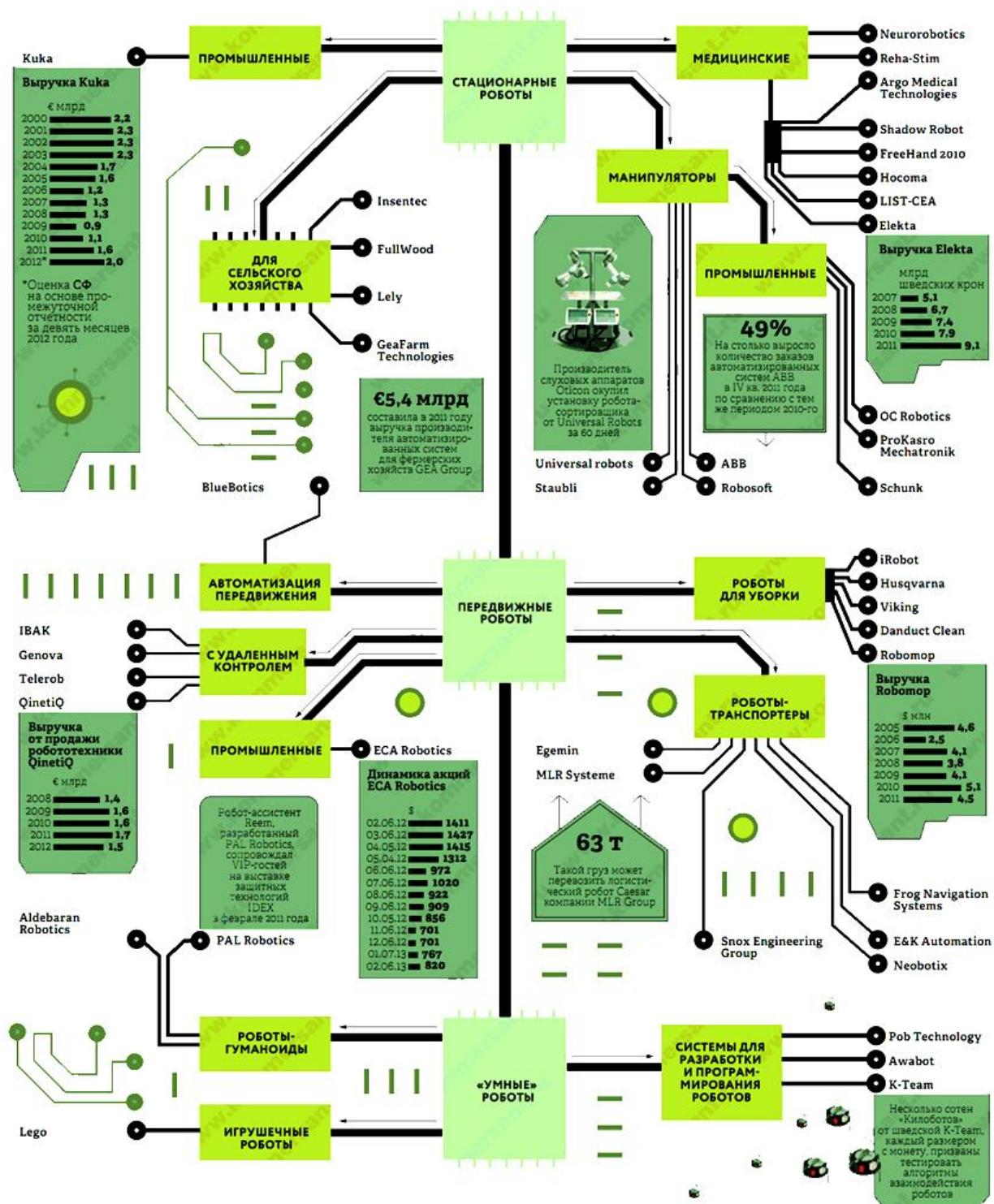


Рисунок 4 – Диаграмма прибылей компаний Запады, производящих роботы

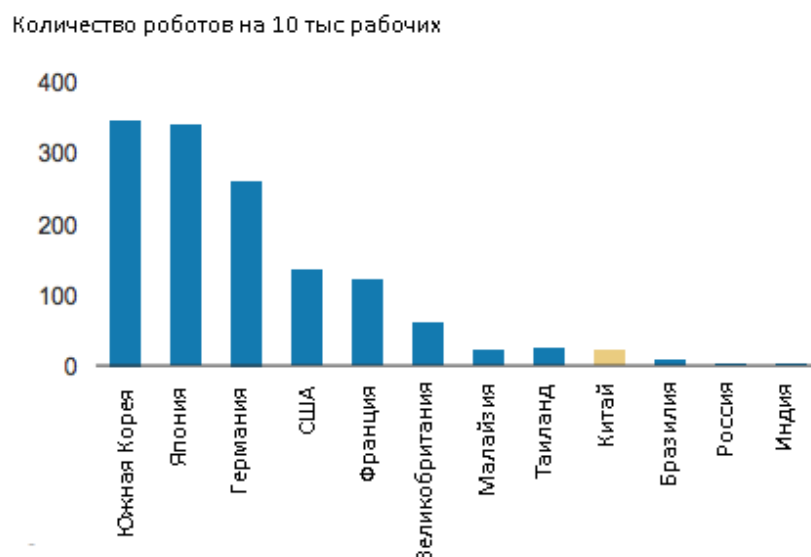


Рисунок 5 – Диаграмма количества ПР на 10 тыс. рабочих в различных странах

Представленный обзор по роботом сфокусирован на *роботах с вращательными степенями подвижности*, т.к. для космических применений и для промышленных задач такие роботы имеет хорошие перспективы.

Наиболее известный в России поставщик ПР – компания KUKA Robotics поставляет свою продукцию только в виде полностью оснащенных роботов или роботизированных комплексов, в качестве комплектующих – линейные блоки, которые позволяют поставить стационарный робот на каретку с направляющими, преобразуя ПР в передвижной ПР. Высокие цены (например, Kuka KR-210 Robotic Painting Cell стоит порядка 300 тыс. долл.) оправданы высокой надежностью и хорошим сервисом. Компания специализируется на ПР средней и большой грузоподъемности.

Фирма KUKA выпускает большой спектр ПР, предназначенных для сборки, окраски, сварки, паллетирования и других операций.

Все ПР средней грузоподъемности отличаются тем, что большинство степеней подвижности ПР – вращательные, которых обычно 5-6 степеней. Робот KR 5 scara R350, предназначенный для сборки, имеет радиус действия 350 мм при грузоподъемности 5 кг и точности позиционирования 0,03 мм

(рисунок 6). Требуемая площадь для установки самого робота составляет всего около 150 x 150 мм, у него 4 степени подвижности. Робот KR AGILUS five имеет радиус действия 700 мм при грузоподъемности 6 кг и точности позиционирования 0,03 мм, 5 степени подвижности (рисунок 7). Максимальная грузоподъемность робота KR 6 R900 sixx составляет 6 кг, а радиус действия – прилб. 901 мм мм при грузоподъемности 6 кг и высокой точности позиционирования 0,03 мм., 6 степени подвижности.



Рисунок 6 – Робот KR 5 scara R350



Рисунок 7 – Робот KR 6 R900 sixx

Конкурент выше указанной фирмы – FANUC Robotics также располагает рядом ПР (рисунки 8 - 11) примерно той же конфигурации при средней грузоподъемности [7].

Робот для сварки ARC Mate 100iC грузоподъемностью 10 кг имеет зону досягаемости около 1400 мм и 6 степеней подвижности при точности позиционирования 0,08 мм. Робот для различных технологических операций M-10iA грузоподъемностью 10 кг имеет 5 степеней подвижности и зону досягаемости около 1420 мм при точности позиционирования 0,05 мм. Более легкий робот для упаковывания M-430iA грузоподъемностью 2 кг имеет зону досягаемости около 1130 мм и 5 степеней подвижности при точности позиционирования 0,5 мм, однако средняя скорость движения примерно в 4 раза выше (100 циклов в минуту). ПР с параллельной кинематикой (Δ-робот) M-

ЗiA/6A имеет 6 степеней подвижности при грузоподъемности 6 кг, зона обслуживания Ø1300x500 мм, максимальная скорость 2000 °/с.

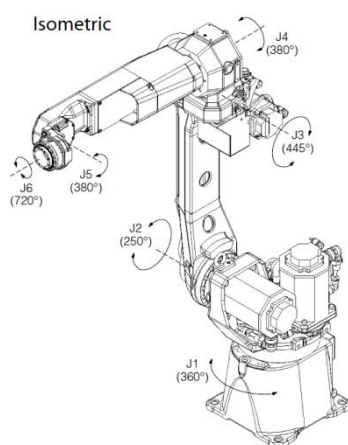


Рисунок 8 – Робот для сварки ARC Mate 100iC



Рисунок 9 – Робот для окраски M-10iA

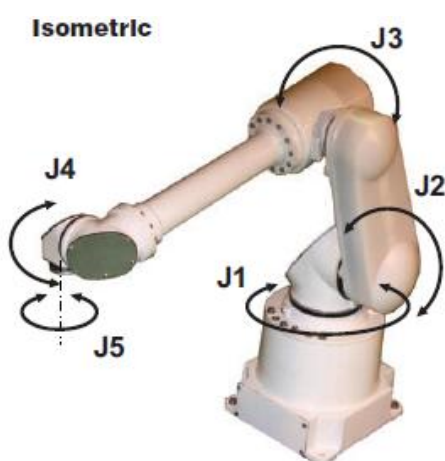


Рисунок 10 – Робот для пакетирования M-430iA



Рисунок 11 – Δ-робот для пакетирования M-ЗiA/6A

Датская компания Universal Robots ApS выпускает ПР с 6 степенями подвижности грузоподъемностью 5 и 10 кг (рисунок 12) [8].

Манипулятор робота представляет собой руку, закрепленную на основании. Его характеристики:

- вес 28,9 кг;
- полезная нагрузка 10 кг;

- зона досягаемости: 1300 мм;
- диапазон объема движений сочленений: $\pm 360^\circ$ для всех соединений;
- скорость: в шарнирах: макс. 120/180 $^\circ/\text{с}$, рабочий орган: примерно 1 м/с;
- точность позиционирования: $\pm 0,1$ мм;
- площадь у основания: $\varnothing 190$ мм;
- степени свободы: 6 поворотных.



Рисунок 12 – ПР Universal Robot 10

По своей структуре робот имеет руку антропоморфного типа. Очувствление по сило-моментному каналу не предусмотрено. Дистрибьютор в Санкт-Петербурге – фирма FAM-robotics [9].

Компания SHUNK (Германия) выпускает робот LWA 4D аналог робота Universal Robot 10, который выгодно отличается малым весом, причем имеет 7 степеней подвижности (рисунок 13). Его характеристики:

- вес 17,5 кг;
- полезная нагрузка 10 кг;
- зона досягаемости: 1030 мм;

- диапазон объема движений сочленений: $\pm 180^\circ$ для большинства шарниров;
- скорость: в шарнирах, $^\circ/\text{с}$: макс. 40/72;
- точность позиционирования, мм: $\pm 0,15$;
- диаметр у основания, мм: $\varnothing 186$;
- степени свободы: 7 поворотных.

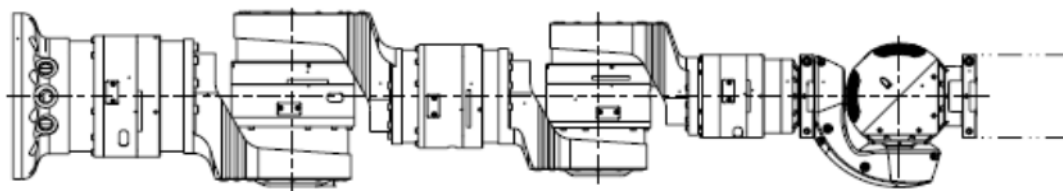


Рисунок 13 – Робот компании SHUNK LWA 4D

Компактность и пониженный вес робота достигается за счет применения двухступенного модуля последнего звена руки. Робот оснащен сило-

моментными датчиками. Имеется целый набор промежуточных модулей, которые позволяют быстро производить смену не только рабочих органов, но и модулей степеней подвижности.

Шести степенной промышленный робот LWA 4.6 имеет двухкоординатные поворотные модули Powerball ERB (рисунок 14).



Рисунок 14 – Шести степенной робот LWA 4.6 SHUNK

Благодаря использованию двухкоординатных мехатронных модулей робот имеет вес примерно в 1,5 раза меньше, чем робот с аналогичными однокоординатными модулями. Дистрибьютор в Санкт-Петербурге – фирма ООО «ШУНК Интек» [10] .

2.2 Манипуляционные системы в авиастроении

Наиболее перспективной областью использования разрабатываемых в роботизированных систем космического применения является авиационная и аэрокосмическая отрасль российской промышленности. Доказательством этого тезиса служит опыт Европейского союза [11].

В Европе, в целях повышения конкурентоспособности и создания технологических ноу-хау в авиастроении лидирующий технический институт Германии Fraunhofer Institute в сотрудничестве с концернами AIRBUS Military, FACC, инжиниринговой компанией IDPSA и производителем промышленных роботов KUKA, изучает применение роботизации в аэрокосмической промышленности. Работы проводятся в рамках программы автоматизации, одобренной Еврокомиссией. Приведем некоторые примеры успешного применения ПР в аэрокосмической промышленности, которая требует использование высококвалифицированных работников.

Компания OCRobotics (Великобритания) разработала уникальное решение для различного использования в авиастроении и ядерной промышленности, одним из потребителей которого стал концерн AIRBUS. На руку стандартного ПР устанавливается телескопический змеевидный робот собственного производства (в проекте AIRBUS – 27 степеней свободы) с удаленным управлением, позволяющий получить доступ к сложным участкам, недоступным для любых средств стандартной автоматизации, к примеру внутренней конструкции крыла (рисунок 15) [12].



Рисунок 15 – Роботизированная система OCRobotics

Такая система позволяет осуществлять удаленный мониторинг объектов, нанесение уплотнений и т.д.

Одной из самых значимых и трудоемких технологий в авиации для применения ПР является сверление отверстий и клепка. Уходя от ручных операций с применением соответствующих кондукторов, авиастроение внедряет роботизированные системы, позволяющие осуществлять точное позиционирование для выполнения сверления с применением систем машинного зрения, в частности, для дополнительного контроля качества. К примеру, фюзеляж требует сверления тысяч отверстий и выполнение их вручную – огромный трудозатратный процесс (рисунок 16).



Рисунок 16 – Позиционирование изделия роботами для сверления отверстий, AIRBUS

Испанский концерн MTorres разработал свое оборудование – это мобильный робот FDH (Flexible Drilling Head), который перемещается по фюзеляжу. Он устанавливается по месту с помощью вакуумных присосок, осуществляет сверление и клепку до дальнейшего движения со скоростью 3,5 мм/мин. до следующего положения (рисунок 17). Этот пяти-осевой робот,

который весит около 100 кг, используется в программе AIRBUS A380 для сверления около 8500 отверстий секции 19 фюзеляжа.

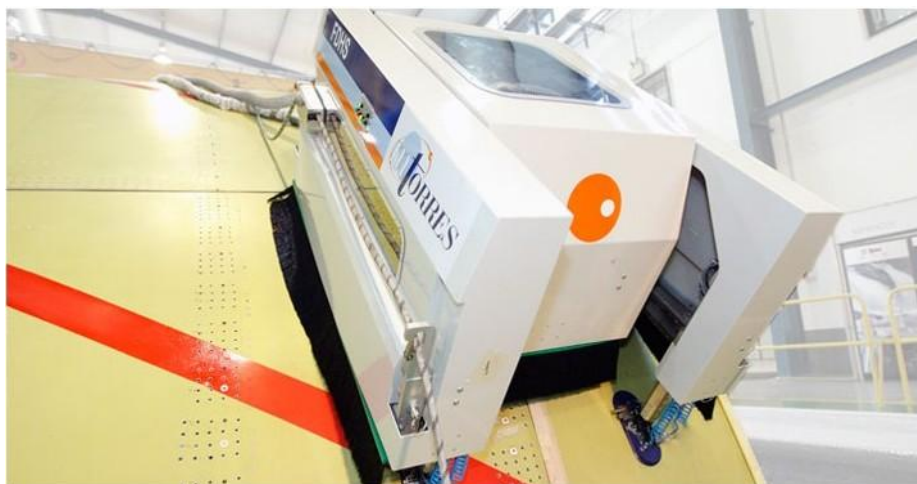


Рисунок 17 – Сверлильный робот MTorres

Во Франции специализированная компания Coriolis Composites использует ПР для нанесения композитных материалов, разрабатывая специализированное оборудование с привлечением производителя KUKA (рисунок 18). Системы используются в проекте обшивки фюзеляжа A30X (новое поколение A320), проектах концерна EADS, частей фюзеляжа самолетов CSeries Bombardier и т.д.

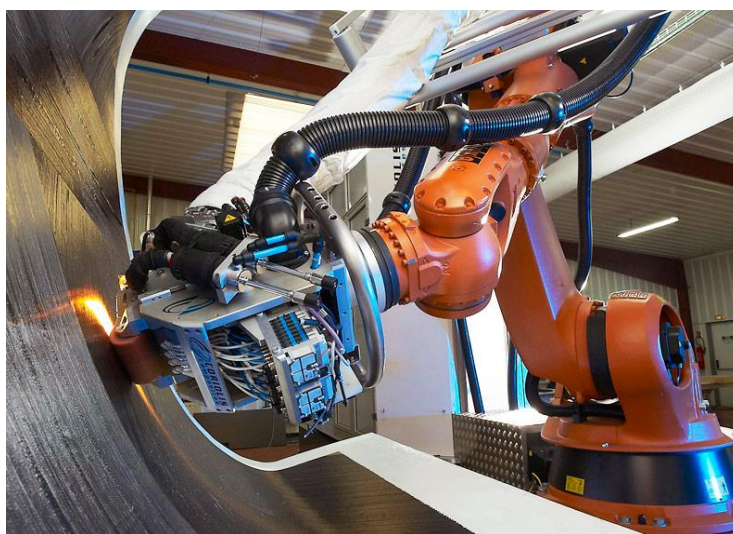


Рисунок 18 – Роботизированный комплекс для выкладки композитов Coriolis Composites.



Рисунок 19 – Полная роботизированная окраска самолета F35

Роботы могут смывать, наносить жидкость для удаления грязи, чистить и наносить краску, включая возможность доступа в сложные места для окраски против коррозии (рисунок 19).

Так, на заводе Boeing в Everett (США), два роботизированных комплекса обрабатывают трехметровую панель крыла самолета 777. Вручную процесс занимал 4,5 часа с нанесением первого покрытия. Роботы делают все за 24 минуты с превосходным качеством. С 2015 года компания перешла на роботизированную окраску всех крыльев Boeing -777.

3 СЕРВИСНЫЕ РОБОТЫ

По прогнозам ведущих специалистов бизнеса в области робототехники опережающими темпами в ближайшее десятилетие будут развиваться сервисные роботы. В стоимостном выражении рынок сервисных роботов в 2018 составляет около 85% от всего рынка роботов (рисунок 20) [13].

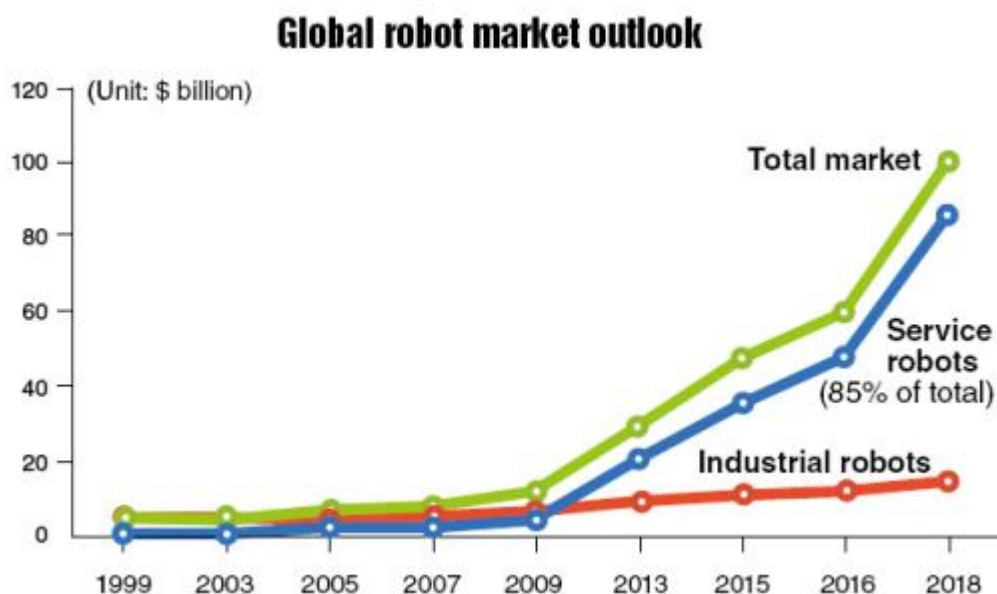


Рисунок 20 – Динамика мирового рынка роботов

3.1 Антропоморфные роботы

Максимальное геометрическое подобие робота человеку получило широкое распространение в демонстрационных роботах для рекламы и развлечений. Как правило, они имеют «руки», «ноги», «туловище» и «голову», по внешнему виду напоминающие человеческие. Однако, в качестве орбитальных СР подобные андройды бесперспективны, так как «ноги» оказываются непригодными ни для перемещения, ни для манипулирования, ни для крепления на конструктивных элементах КА. Для замещения человека на большинстве операций по обслуживанию КА достаточно частичное подобие человеку без аналогов ног. Такие антропоморфные РТС могут содержать два многоцелевых манипулятора — аналога «рук», — телевизионную систему — аналог «головы» — и корпус — аналог «туловища». Вместо «ног» на корпусе РТС целесообразно установить устройство крепления на конструкциях КА, а многоцелевые манипуляторы можно использовать как для перемещения перешагиванием по конструкциям КА, так и для технологических операций.

Таким образом, решение задачи функционирования на КА, изначально построенных для людей, состоит в разработке манипуляторов и ЗУ, обеспе-

чивающих возможность движения РТС по конструктивным элементам, созданным для космонавтов, не более того.

Упрощенно кинематику руки человека можно ограничить количеством степеней свободы, равным 12 (включая две, относящиеся к захватам пальцев), однако ключично-лопаточный сустав с тремя степенями свободы человек использует довольно редко (рисунок 21). Таким образом, для антропоморфных РТС, близких по характеристикам руке человека, можно ограничиться семью степенями свободы (без рабочего органа).

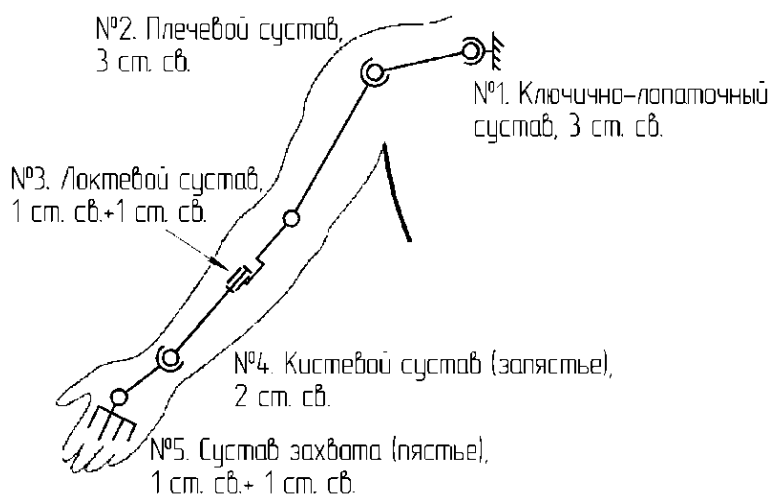


Рисунок 21 – Модель кинематики руки человека

На практике эффективность работы двух- и трехстепенных механизмов и приводов (например, на базе устройств с параллельной кинематикой) ограничена в виду их сложности, малой рабочей зоны и громоздкости. По этой причине основным принципом построения руки РТС на данный момент остается последовательная кинематическая цепь одностепенных шарниров с различными моментными характеристиками приводов.

Robonaut R2 – робот антропоморфного типа, предназначенный для работы на наружной поверхности космических аппаратов, внешний вид робота представлен на рисунке 22. Разработка робота ведётся под руководством NASA и Управления перспективных проектов Министерства обороны США (DARPA) лабораторией Oceanengineering Space Systems, США [14].

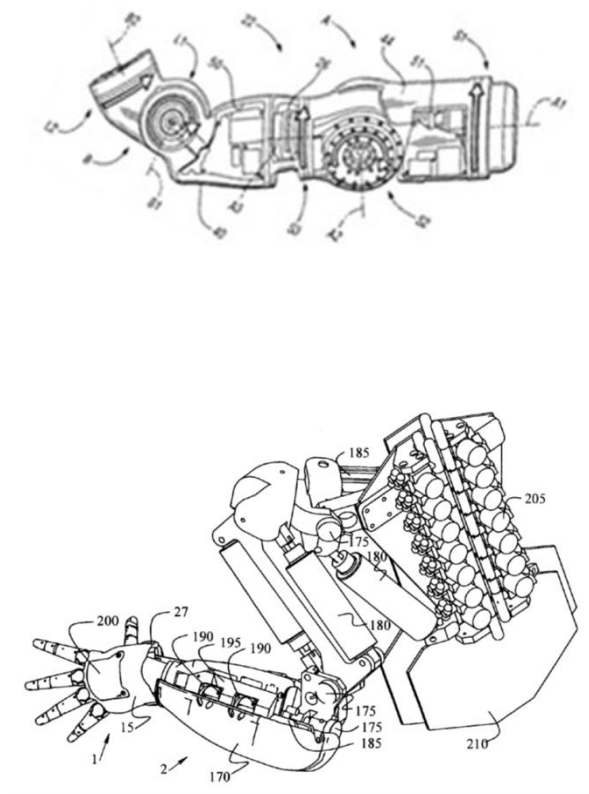


Рисунок 22 – Робот Robonaut R2: общий вид, рука, конечность

Основными задачами робота предполагаются ликвидация нештатных ситуаций в открытом космосе, сервисные работы, а также инспекция наружной поверхности космических аппаратов. Размеры и пропорции робота совпадают с человеческими, в его состав входят: две «руки», «голова», «шея» и «торс». В «голове» робота расположены четыре видеокамеры, две из которых обеспечивают выдачу стереоизображения для робота и операторов, две другие используются только собственной системой управления робота. Кроме того, в области «рта» расположена инфракрасная камера. «Шея» робота имеет три степени свободы. Манипулятор каждой «руки» R2 обладает семью степенями свободы и способен в условиях земной гравитации держать нагрузку до 9 кг. Каждая «кисть» R2 имеет 12 степеней свободы: четыре – большой палец, по три – средний и указательный, по одной – безымянный и

мизинец. Каждый палец может создавать нагрузку в 2,3 кг. Все процессоры робота находятся в его «торсе», а именно – в области «живота». Батареи робота или преобразователь питания (в зависимости от режима работы) находятся в «рюкзаке».

Сенсорная система каждой из «рук» робота имеет по сто пятьдесят датчиков, включая в себя температурные, пространственные, тактильные датчики, а также датчики измерения прилагаемого усилия. Одним из способов управления роботом является специальный джойстик с силовой обратной связью, имеющий шесть степеней свободы. Также возможно задание действий при помощи голосовых и жестовых команд.

Робот обладает стереоскопическим зрением и использует технологию создания виртуального мира, чтобы визуально погрузить оператора в своё рабочее пространство, повышая интуитивность операций на участке работы. Визуальная обратная связь обеспечена шлемом стереоизображения. Датчики силы, встроенные в «руки» и «пальцы» R2, позволяют оператору посредством механического взаимодействия ощущать нагрузки, воспринимаемые роботом.

Robonaut 2 запущен NASA в космос с целью постоянного расположения на МКС на шаттле Discovery в ходе запуска STS-133 24 февраля 2011 г. На рисунке 23 показан Robonaut 2, уложенный в тару для отправки на орбиту. Характеристики робота приведены в таблице 1.



Рисунок 23 – Robonaut 2 в капсуле для отправки на МКС

Таблица 1 – Характеристика Robonaut 2

Параметр		Значение/характеристика
Количество степеней свободы РТС		42, в т.ч. 2 манипулятора, 2 кистевых узла, шейный отдел
Количество степеней свободы манипулятора		7
Автономная работа		Источник питания: Li-Ion, 2500 Втч; время работы – до 4 ч
Решаемые задачи		а) сервисные работы; б) участие в проведении исследований
Тип управления		копирующее, супервизорное
ВВФ	возможность работы в вакууме	Есть
	диапазон рабочих температур, °C	от минус 100 до плюс 120
Развиваемое усилие манипулятора, Н		90
Масса, кг		150
Длина x ширина x высота, мм		800 x 400 x 1300
Интерфейс		MLVDS
Силомоментное оучувствление		есть

Оператором робота может быть как член экипажа станции, так и оператор на Земле. Кроме того, по сравнению с роботом предыдущего поколения, R2 не требует постоянного телеуправления. В расчёте на будущие цели, где расстояния и временные задержки сделают непрерывное управление проблематичным, R2 способен воспринимать команды и исполнять их автономно с периодической проверкой состояния.

Eurobot – сервисный робот разрабатывается под контролем Европейского космического агентства (ESA) компанией ESTEC, Нидерланды [2]. Внешний вид робота представлен на рисунке 24.

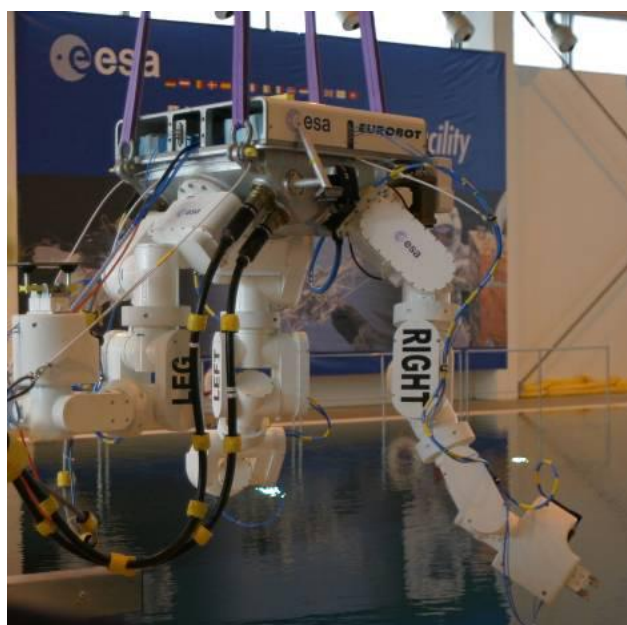


Рисунок 24 – Eurobot

Целью создания робота является экономия времени и облегчение работы космонавтов за счёт выполнения им различных рутинных задач на МКС. Он может выполнять инспекционные работы, а также работы по обслуживанию под дистанционным контролем оператора, находящегося внутри МКС.

Разработка проводится с 2003 г., в 2006 – 2007 г.г. были проведены испытания в бассейне Европейского центра астронавтов, где имитировались условия микрогравитации. После 2007 г. основные работы ведутся над мобильной платформой для передвижения Eurobot по Марсу и над совершенствованием системы телеуправления.

Eurobot включает следующие подсистемы:

- «руки»-манипуляторы DexArm с устройствами смены инструмента CTED ;
- система компьютерной телеметрии VIMANCO, которая позволяет роботу идентифицировать и захватывать объекты;
- центральная система управления CONTEXT, координирующая движения манипуляторов;
- человеко-машинный интерфейс Exoskeleton;
- станция контроля A-DREAMS, используемая для программирования и управления роботом.

Каждый манипулятор Eurobot оборудован камерой и исполнительным элементом одного из разработанных взаимозаменяемых типов. Главная камера на корпусе и механизм наклона обеспечивают контролирование рабочей зоны.

С целью автоматизации работ в космосе требуется, чтобы системы технического зрения позволяли роботу выполнять необходимые точные взаимодействия с окружающей средой, что повышает его автономность. Система VIMANCO включает следующие компоненты:

- телевизионная стереопара и две независимых камеры, оснащенные системами освещения;
- трехмерный графический интерфейс отображения окружающей среды;
- подсистема обработки и библиотека объектов, определяющие и отслеживающие объект;
- тренажер автоматизации, заменяющий функциональные возможности диспетчера робота;
- станция контроля, позволяющая оператору управлять VIMANCO.

Аппаратные средства системы CONTEXT включают блок управления робота, соединённый через шину с тремя платами управления манипулято-

рами. Каждая плата состоит из семи блоков управления сервоприводами шарниров и снабжена специализированным внутренним аккумулятором. Характеристика Eurobot приведена в таблице 2.

Робот Justin, внешний вид которого представлен на рисунке 25, разрабатывается отделом антропоморфных роботов компании DLR, Германия, в основном, в исследовательских и демонстрационных целях [14]. Верхняя часть робота имеет 43 управляемых степени свободы, она оснащена датчиками момента, дающими возможность проводить манипуляционные операции с силомоментным оцувствлением.

Таблица 2 – Характеристика Eurobot

Название параметра РТС		Значение параметра
Количество степеней свободы РТС		48, в т.ч. 3 манипулятора, 3 трёхпальцевых кистевых узла
Количество степеней свободы манипулятора		7
Решаемые задачи		замена человека в сервисных работах при ВнутКД/ВнеКД
Стойкость к ВВФ	возможность работы в вакууме	да
	диапазон рабочих температур, °С	от минус 30 до плюс 70
Развиваемое усилие манипулятора, Н		70
Тип управления		копирующее, супервизорное
Масса, кг		180
Длина х ширина х высота, мм		700х700х900
Интерфейс		CAN-Ethernet/SpaceWire
Силовоймоментное управление		да

В качестве демонстрации возможностей робота продемонстрирована его способность ловить на лету теннисные мячи, которые бросает ему чело-

век, а также способность готовить кофе. Высокоточные датчики движения позволяют роботу корректно вычислять траекторию движения летящих мячей, причем ловить их он может двумя руками одновременно. По данным разработчиков точность попадания во время тестовых испытаний составляла 80 %.



Рисунок 25 — Робот Justin

Благодаря чувствительности своих «пальцев», робот может самостоятельно засыпать кофе в кофеварку, нажимать на клавишу и подставлять чашку для готового напитка. Уникальность процесса заключается в том, что датчики обработки видеоизображения не всегда фиксируют мелкие детали, с которыми приходится иметь дело роботу (пазы крепления и зажимы кофеварки). И в тех случаях, когда роботу не хватает видеоинформации, он координирует свои действия за счет осязания (тактильного очувствления).

Верхняя часть робота («торс», «шея», «голова», манипуляторы и кистевые узлы) имеет достаточно низкую массу, что позволяет разработчикам говорить о будущем применении робота в космическом пространстве при условии его соответствующей доработки. Характеристики робота приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристика робота Justin

Название параметра РТС		Значение параметра
Количество степеней свободы РТС		49, в т.ч. 2 манипулятора, 2 кистевых узла, торс, шейный отдел, колёсная платформа
Количество степеней свободы манипулятора		7
Автономная работа		Источник питания: Li-Po, 1900 Втч; время работы 1 ч
Решаемые задачи		демонстрационные
Стойкость к ВВФ	возможность работы в вакууме	нет
	диапазон рабочих температур, °С	от 0 до плюс 70
Развиваемое усилие манипулятора, Н		75
Тип управления		копирующее, программно-адаптивное
Масса, кг		165
Длина x ширина x высота, мм		985x815x1600
Интерфейс		Ethernet/CAN
Силовой моментное управление		да

Робот SAR-400 разрабатывается НПО “Андроидная техника” совместно с ФГУП ЦНИИмаш для применения на наружной поверхности МКС и других КА, внешний вид робота представлен на рисунке 26. Целью разработки является замена роботами человеческого присутствия для снижения риска жизни экипажа и снижение финансовых затрат на поддержание жизнедеятельности.

тельности космонавтов [15]. Первым этапом практического применения SAR-400 предполагается работа на МКС.

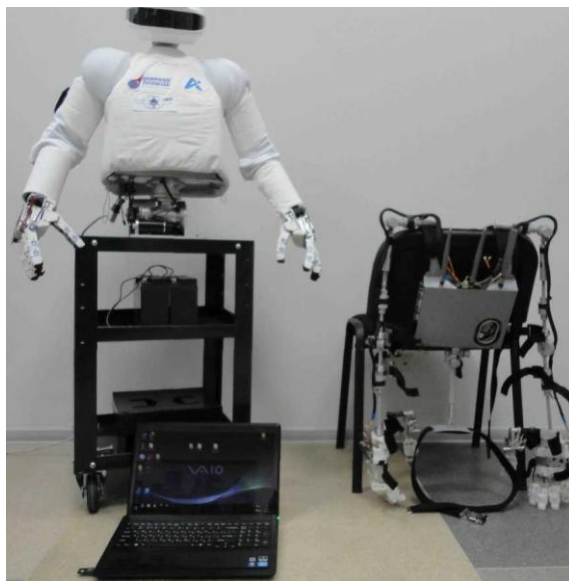


Рисунок 26 – Робот SAR-400

В конце 2011 г. было проведено тестирование робота в Центре подготовки космонавтов. Отработка технологических операций и манипуляций проводилась на полноразмерном макете станции «Мир» и тренажёре «Выход-2». Также отрабатывалось взаимодействие робота и космонавта. В настоящее время ведутся работы по совершенствованию робота и устранению ряда ошибок, возникающих при выполнении им сложных задач.

Планируется, что оборудование и датчики позволят реализовать тактильную обратную связь оператору на Земле, следовательно, оператор будет

иметь возможность ощущать поверхности и объекты, к которым прикасается манипулятор робота. Конструкторами была поставлена цель – добиться максимального сходства между руками робота и человека. Управление роботом SAR-400 предполагается осуществлять либо космонавту, либо оператору с Земли. Основным вариантом управления является копирующее, в костюм оператора входят жилет и экзоскелет с перчатками. Характеристики робота приведены в таблице 4 [17].

Таблица 4 — Характеристики SAR-400

Название параметра РТС		Значение параметра
Количество степеней свободы РТС		43, в т.ч. 2 манипулятора, 2 кистевых узла, шейный отдел, подвижность устройства фиксации
Количество степеней свободы манипулятора		6
Решаемые задачи		а) проведение сервисных работ внутри и вне МКС; б) диагностика неисправностей; в) ликвидация НШС на МКС
Стойкость к ВВФ	возможность работы в вакууме	да
	диапазон рабочих температур, °С	от 0 до плюс 70
Развиваемое усилие манипулятора, Н		50
Тип управления		копирующее
Масса, кг		144
Длина х ширина х высота, мм		700х 450х1000

Рассуждая об оптимальности конструкции РТС, важно заметить, что все описанные в первом разделе антропоморфные роботы не являются полностью подобными человеку. В частности, роботы Robonaut, Robonaut 2, Justin имеют в «кистях» всего по 12 степеней свободы вместо 20: по одной вме-

сто четырех в безымянном пальце и мизинце, по три вместо четырех в указательном и среднем пальцах. Робот HRP-4 вообще имеет в «кистях» только две степени свободы и только две — в «руках» (вместо семи человеческих). При этом «не считающиеся» антропоморфными манипулятор СБМ «Аист», манипулятор Canadarm имеют шесть степеней свободы, а Canadarm2, ERA имеют семь степеней свободы (и подобны человеческой руке), причем обе кинематические схемы являются в робототехнике классическими по причине удовлетворения принципу необходимости и достаточности. Таким образом, схема построения и размеры звеньев ЗУ («кистей») и «рук» РТС должны быть точно просчитаны на основе критерия эффективности выполнения поставленных задач, а не условия полного подобия человеку; очевидно, даже разработчики рассмотренных антропоморфных роботов руководствовались схожими принципами.

Сформулируем достоинства и недостатки биоморфных РТС космического назначения, по сравнению с «оптимальными» РТС, разработанными под конкретные задачи.

Достоинства:

- априори предполагаемая возможность работы биоморфной РТС на КА (правда, для каждой конкретной РТС эта возможность должна быть доказана исходя из ее реальных технических характеристик);
- снижение трудоемкости формулирования точных технических требований к РТС (за счет переноса этой трудоемкости на стадию разработки РТС, т.е. перекладывания ее на исполнителя);
- эргономичность, интуитивная понятность оператору задающих органов и средств восприятия сигналов обратных связей при ручном управлении — эффект удаленного присутствия (однако, стоит отметить, что обучение оператора работе с экзоскелетом требует не меньше времени, чем обучение работе с другими видами задающих органов, что подтверждается на примере

проекта Eurobot; в автоматических же режимах движения РТС устройства ручного управления и вовсе не используются либо используются частично).

Недостатки:

- существенная избыточность биоморфных механизмов, причины которой должны быть четко обоснованы по причинам, указанным далее;
- снижение надежности всей системы за счет увеличения количества узлов и компонентов, способных выйти из строя;
- существенные функциональные ограничения РТС вследствие несовершенства технических устройств в сравнении с их биологическими прототипами (которая в обозримом будущем не может быть преодолена) или невозможность выполнения задач, требующих от РТС характеристик, превышающих характеристики человека (например, больших усилий), в то время как РТС строились по принципу подобия человеку;
- повышенные энергопотребление и сложность технического обслуживания, пониженная ремонтпригодность;
- существенное увеличение стоимости как самих РТС, так и их разработки, увеличение сроков работ на всех стадиях проектирования и изготовления.

При всех отмеченных недостатках, задача построения биоморфных (в частности, антропоморфных) РТС остается актуальной научно-технической проблемой мирового уровня и не должна отвергаться. Исследования и создание научно-технического задела в этой области должны быть продолжены, а применение таких РТС в конкретных задачах должно быть обосновано достигнутыми характеристиками каждой отдельной РТС.

В 2011 г. Европейское космическое агентство приступило к испытаниям мобильного робота-манипулятора, предназначенного для движения по поверхности планет (рисунок 27) [18].



Рисунок 27 – Eurobot Ground Prototype

Eurobot Ground Prototype является подобием колесного мини-комбайна для дорожно-строительных нужд.

3.2 Мобильные роботы

В развитых странах Запада выпускается большая номенклатура мобильных роботов военного назначения и для чрезвычайных ситуаций. Международная компания СОВНАМ [19] выпускает мобильные роботы серии TEL600 для разминирования и обезвреживания опасных объектов, например, при утилизации самодельных взрывных и зажигательных устройств, оснащены манипулятором с 6 степенями подвижности и тремя видеокамерами (рисунок 28). Такие роботы называют EOD robots (Explosive Ordnance Disposal – обезвреживание боеприпасов).

Для перемещения по пересеченной местности используются четыре гусеничных привода, которые могут поворачиваться вокруг горизонтальных осей. Такой принцип движения позволяет преодолевать ступени лесничных маршей.

Более мощный робот такого же назначения tEODor имеет следующие характеристики (рисунок 29).

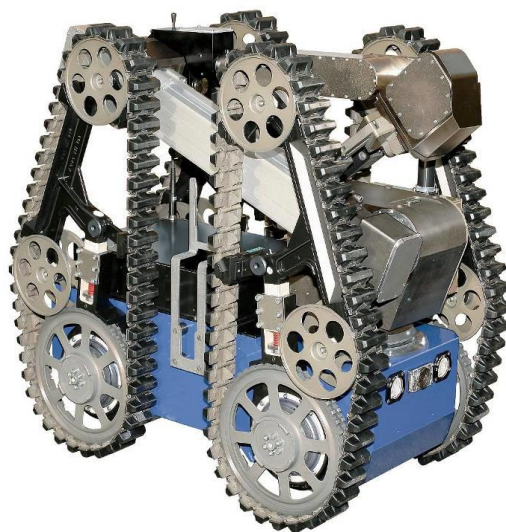


Рисунок 28 – Мобильный комплекс, оснащенный роботом TEL610 и робот в сложенном положении



Характеристики

Длина / ширина / высота: 1 300/685/1 240 мм

Вес: 375 кг

Скорость: макс. 3 км / ч

Подъем, преодолеваемый: 45 °

Диаметр разворота: 1 460 мм

Полезная нагрузка: 350 кг

Тяговое усилие: 3000 Н

Зона сервиса манипулятора: вертикальный / горизонтальный: 2 860/1 860 мм

Вращения башни: $\pm 205^\circ$

Наклон руки: $+144^\circ$, -85°

Наклон плеча: $\pm 110^\circ$

Подъем каретки: 0 - 390 мм

Наклон схвата: $+120^\circ$, -95°

Вращение схвата: $\pm 360^\circ$

Ход губок схвата: 300 мм

Сила схвата: 600 Н

Панель управления

Ширина / Высота / Глубина 440/350/310 мм

Вес панели управления: 9 кг

Рисунок 29 – Робот tEODor и его характеристики

Такие роботы имеют сменные схваты и другие специальные рабочие органы, которые могут быть оснащены водяными пушками и баллонами с инертным газом.

Заслуживают внимания мобильные СР с змееподобной (хоботоподобной) рукой, разработанной английской фирмы OC Robotics (рисунок 30) [20].



Рисунок 30 – Робот со змееподобной рукой серии Explorer 150 на разных операциях

Эти роботы предназначены для работы в зонах повышенной радиации, рука робота может изгибаться в двух направлениях. Максимальная длина руки 3 м, грузоподъемность 7 кг, полный изгиб руки осуществляется за 3 с.

На рынке постоянно появляются новые по своим функциям роботы для домашнего хозяйства и бытовых нужд (рисунок 31 а – д). Робот Karcher RC3000 имеет пылесборник объемом 0,2 л, однако база, которая идет в комплекте, оснащается пылесборником объемом 2 л. Немецкий робот-пылесос самостоятельно находит базу, становится на зарядку и освобождает контейнер от мусора.



а



б



в



г



д

Рисунок 31 – Сервисные роботы для домашнего хозяйства: а - Робот-пылесос Karcher RC3000 Robo Cleaner, б - Робот для мойки полов Mint, в - Робот-газонокосилка Caiman Ambrogio L300 Carbon, г - Робот для чистки бассейна Zodiac Cybernaut, д - Робот для мойки окон Windoro WCR-I001

Выгрузив весь накопившийся мусор в контейнер, Karcher RC3000 возвращается туда, где он окончил уборку в прошлый раз и продолжает убирать.

Базовая станция включает в себя: выполнение функции подзарядки, специальный вытяжной канал для освобождения пылесборника пылесоса, программирование времени уборки, систему навигации инфракрасным лучом.

Робот для чистки бассейнов Zodiac Cybernaut имеет мягкие валики для качественной очистки дна и стенок бассейна. Робот использует новейший микрочип для быстрой и интеллектуальной обработки данных о типе поверхности, загрязнении и текущем состоянии бассейна. Zodiac Cybernaut использует технологию Clip&Fix – быструю замену щеток. Эта модель робота для чистки бассейна сама определяет время уборки на основе данных о вашем бассейне. Zodiac Cybernaut вычисляет наиболее оптимальный маршрут и время уборки. Время уборки может варьироваться от 30 минут до 6 часов, в зависимости от загрязненности и размера бассейна. Это полностью автономный помощник по уборке вашего бассейна.

Газонокосилка робот Caiman Ambrogio L300 Carbon –робот для лужайки или газона, который может подравнивать газон большой площади. Два литий-ионных аккумулятора позволяют роботу газонокосильщику работать в течении 6 часов, зарядка осуществляется автоматически при парковке на зарядной станции. Модель оснащена сенсором, который в случае дождя дает газонокосилке команду вернуться на зарядную станцию. Уникальный нож Diamond Blade с 4 лезвиями обеспечивает максимальный захват при кошении, равный по ширине колесной базе. Не требует заточки и балансировки. Модель Caiman Ambrogio L300 Carbon имеет сенсорный пульт управления. Технология Bluetooth позволяет производить обмен данными с ПК. Система безопасности газонокосилки предусматривает остановку ножа в случае переворачивания машины, ее подъема над землей или при нажатии на кнопку защитного отключения.

Робот для мойки окон Windoro WCR-I001 [22], используя специальные насадки из микрофибры, а также чистящую жидкость, полностью очищает

стекла с обеих сторон. На одной зарядке аккумуляторной батареи, он сможет помыть до 15 квадратных метров. Время работы на такой площади составит два часа. Windoro предназначен для очистки окон шириной от 16 до 28 мм. Робот состоит из двух частей. Каждая из частей располагается по разные стороны от окна. Используя магнитное поле, робот прилипает к окнам с обеих сторон и крепко держится в вертикальном положении. Стекло оказывается плотно зажато между двумя половинками. Робот для мойки окон имеет специальный навигационный блок, он тщательно проходит все участки стекла.

Робот-гид корейской фирмы Hapool Robotics Corp [21] имеет «дружелюбный» вид (рисунок 32). Он обладает двумя руками с 4-мя степенями подвижности для осуществления несложных манипуляций с простыми предметами. Робот оснащен сложной системой технического зрения, реагирующей на посетителей. В России также разрабатывают сервисные роботы-официанты. Компания «Дин-Софт» (г. Москва) с 2014 года осуществляется продажа роботов-официантов Р.О.Б.И.Н. различной комплектации для ресторанов (рисунок 33).



Рисунок 32 – Робот-гид Hapool Robotics Corp.



Рисунок 33 – Робот-официант Р.О.Б.И.Н.

Структура бортовых устройств робота-официанта Р.О.Б.И.Н. показана на рисунке 34.

Робот-официант перемещается по помещению автоматически без участия оператора.

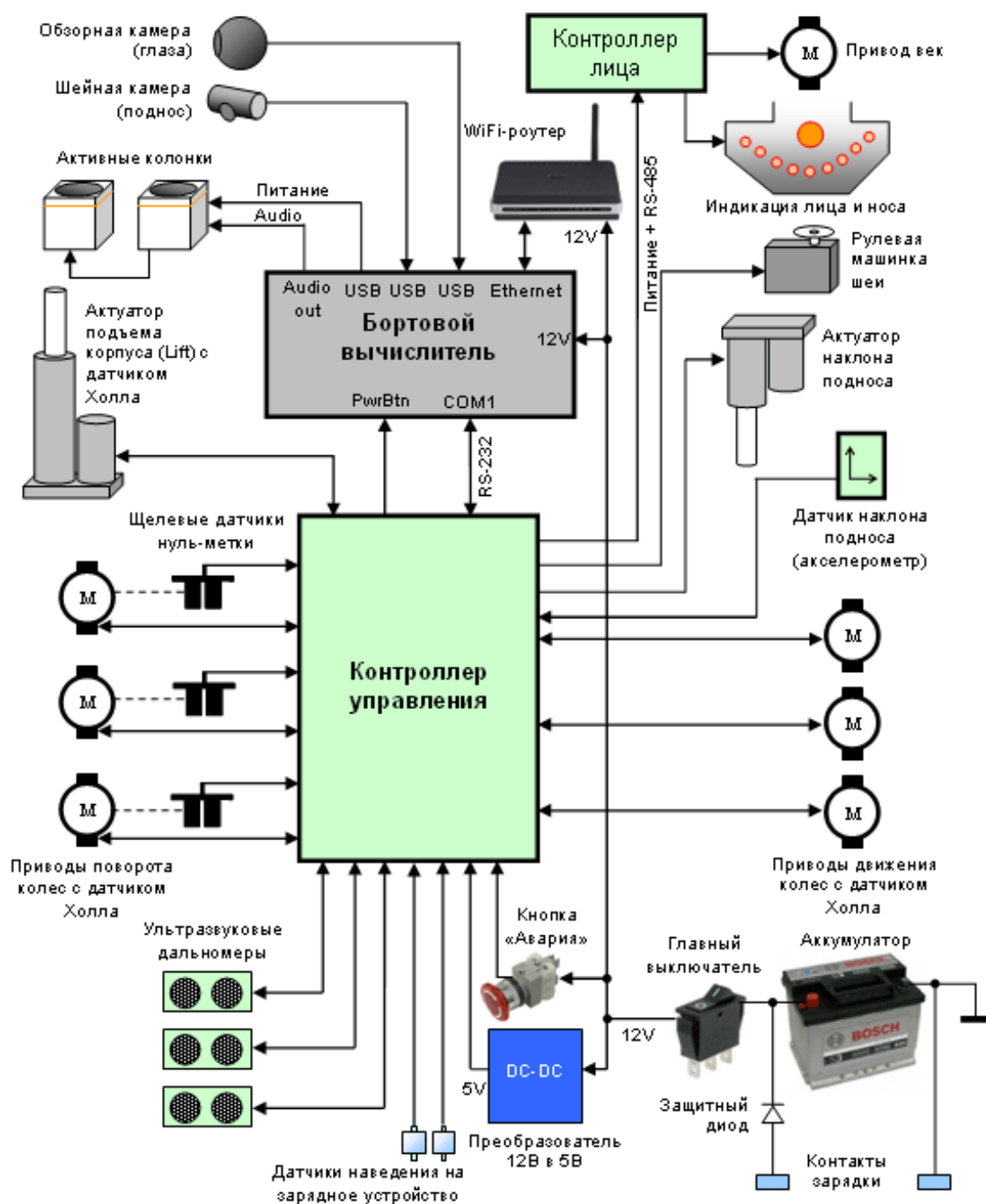


Рисунок 34 – Структура бортовых устройств робота-официанта Р.О.Б.И.Н.

Однако в заведении необходим администратор, в задачу которого входит:

- отслеживание прихода новых посетителей;
- раздача электронных меню через робота посетителям;

- прием оплаты счетов;
- слежение за порядком.

Робот подъезжает к заданному столику и просит гостей взять электронные меню с его подноса. При этом робот следит, какие устройства были взяты с подноса, и отправляет данную информацию на сервер. Таким образом, программное обеспечение электронных меню через сервер получает информацию о том, на какой столик передали соответствующее устройство. Эти устройства переключаются в режим отображения меню ресторана и счета конкретного столика. На сайте компании [23] приведена цена робота – 450000 руб.

4 УСТРОЙСТВА ПОВОРОТА РОБОТОВ

Анализ интернет-источников информации показал, что мехатронные модули ПР и сервисных роботов не поставляются большинством фирм отдельно от роботов за исключением сервисной поставки вышедшего из строя компонента. Модули роботов поставляют в основном компании Германии.

Фирма MONTECH AG (Швейцария) поставляет на рынок вращательные модули DAE-60 (с тормозом и без), имеющие следующие характеристики: угол поворота 3600° (10 оборотов), крутящий момент 3 Нм, скорость $500^{\circ}/с$, угловое ускорение $3000^{\circ}/с^2$, точность позиционирования $\pm 0,01^{\circ}$, привод имеет ременную передачу, а также центральное отверстие Ø15 на валу (рисунок 35). Датчика момента модуль не имеет [24].

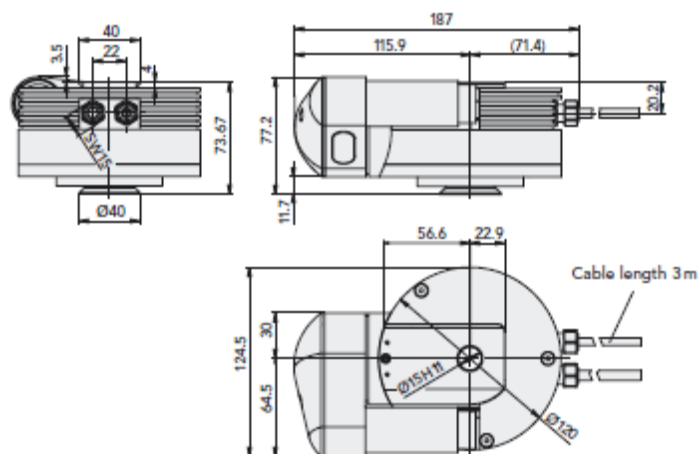


Рисунок 35 – Вращательный модуль DAE-60 : габаритный чертеж и внешний вид

Фирма также поставляет модули линейного перемещения. Поставляются в комплекте контроллеры для указанных модулей. Время поставки изделий – 3 дня.

Компания WEISS (Германия) поставляет модули вращения (рисунок 36), крутящий момент 15 Нм, точность позиционирования $\pm 15''$, вес 8,6 кг. [25]

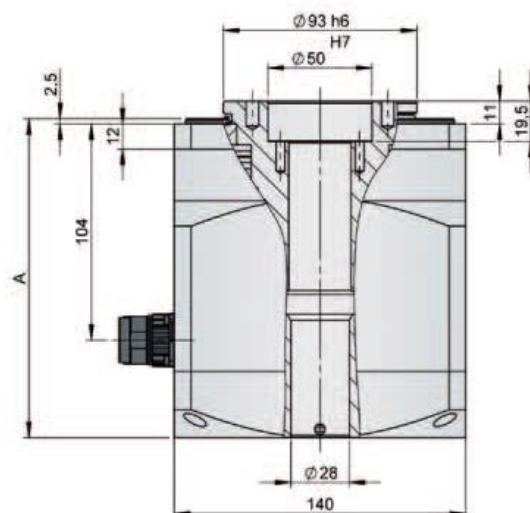


Рисунок 36 – Модули вращения ST/SW

Модули не имеют датчиков крутящего момента. Изделие комплектуется контроллером.

Швейцарская компания Afag Automation AG поставляет на рынок модульные ПР средней и малой грузоподъемности, модули ПР и средства автоматизации (рисунок 37).

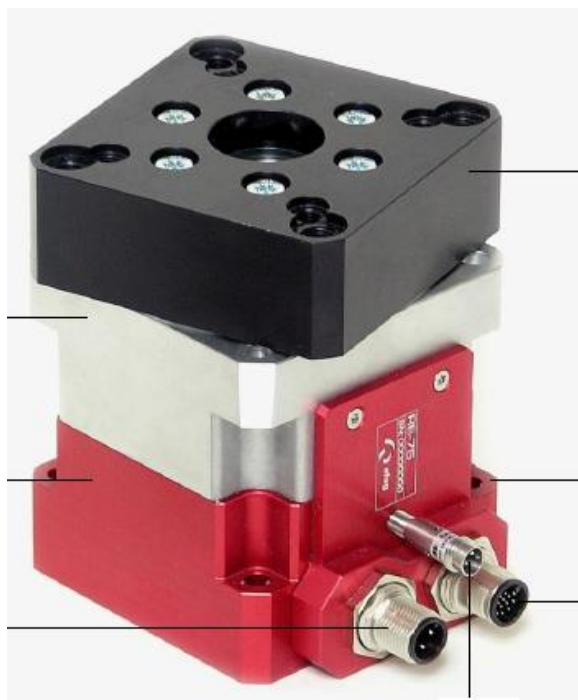
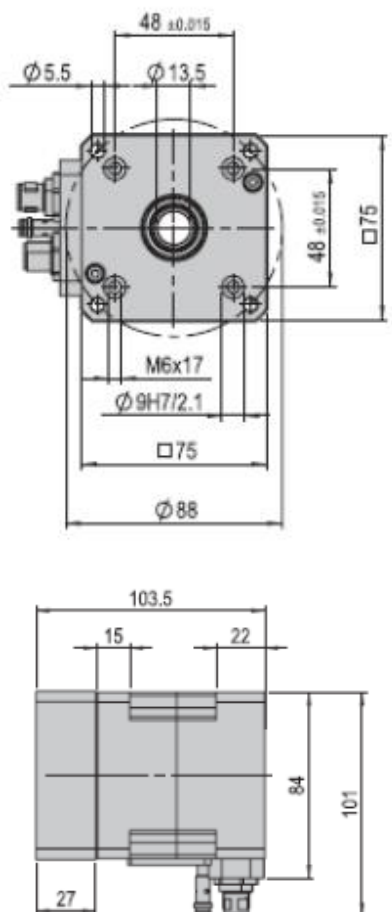
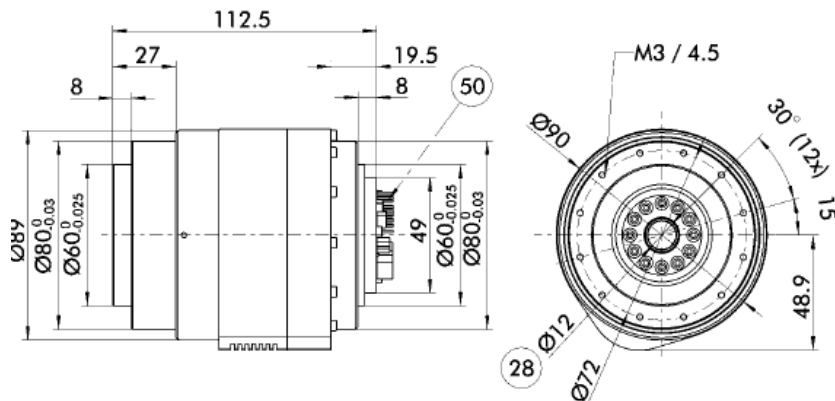


Рисунок 37 – Модуль вращения RE-75

Модули вращения ПР имеют характеристики: максимальный крутящий момент 9 Нм, скорость 100 об/мин, вес 1,7 кг, точность $\pm 6''$ [26].

Модули не имеют датчиков крутящего момента. Изделие комплектуется контроллером.



Модуль вращения PRL 80 имеет следующие характеристики: угол поворота более 360° , номинальный крутящий момент 21 Нм, скорость $25^{\circ}/\text{с}$, угловое ускорение $100^{\circ}/\text{с}^2$, точность позиционирования $\pm 0,02^{\circ}$, имеет центральное отверстие $\varnothing 12$ мм на валу, вес 1,2 кг (рисунок 38). Датчика момента модуль не имеет, однако компания предоставляет модуль датчика крутящего момента, который устанавливается на выходное звено.

60



Рисунок 39 – Двухкоординатный модуль поворота PW 70/90 и пример его использования: 1 – схват, 2 – двухкоординатный модуль

Двухкоординатный модуль поворота PW 70 имеет габариты 165x160x70 мм, угол поворота по одной оси и 240° и более 360° по другой оси, номинальный крутящий момент по осям 12 и 2 Нм, скорость $240^{\circ}/с$, угловое ускорение $960^{\circ}/с^2$, точность позиционирования $\pm 0,04^{\circ}$, не имеет центрального отверстия, вес 1,8 кг.

Другой тип двухкоординатного поворотного модуля – это Powerball ERB. Он имеет крутящий момент до 34 Нм при весе 3,4 кг, угол поворота каждой степени подвижности 340° , скорость $72^{\circ}/с$ (рисунок 40). Другие характеристики в каталоге SHUNK не указаны [27].



Рисунок 40 – Двухкоординатный поворотный модуль Powerball ERB: 1 - контроллер, 2 – абсолютный энкодер, 3 – вентильный электродвигатель, 4 - волновая передача, 5 – тормоз, 6 – отверстие для кабеля; пример применения в 6-степенном роботе LWA 4.6

Благодаря использованию двухкоординатных мехатронных модулей робот имеет вес примерно в 1,5 раза меньше, чем робот с аналогичными однокоординатными модулями. Дистрибьютор в Санкт-Петербурге – фирма ООО «ШУНК Интек» [28] .

Компания Harmonic Drive выпускает большой спектр мехатронных электроприводов, включающих мотор-редукторы. К ним относятся серии СНА, СНМ. FНА-С, FНА-min, FFA, FRA, PMA (рисунок 41). В таблице 5 приведены данные о выборе серии мотор-редукторов в зависимости от требований заказчика.

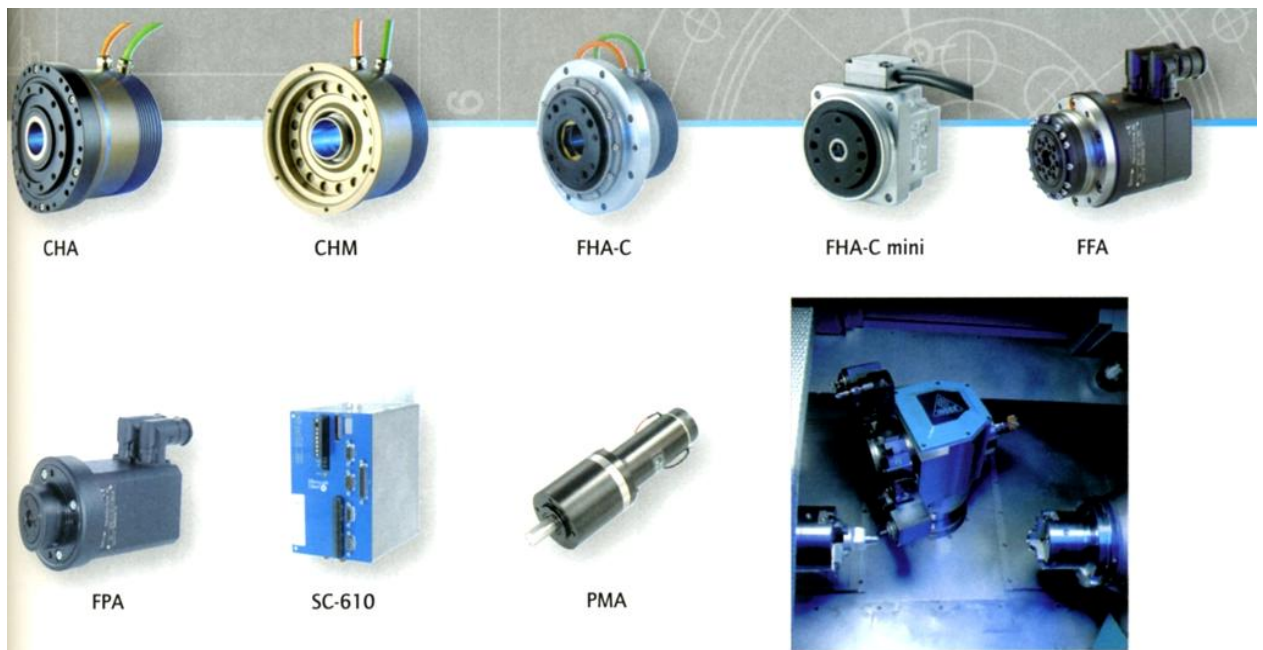


Рисунок 41 – Серии мотор-редукторов Harmonic Drive

Таблица 5 – Таблица выбора серии мотор-редукторов [29]

Sehr gut very good gut good							
Servoantriebe	Hohe Drehmomente	Hervorragende Genauigkeit	Extrem hohe Dynamik	Hohe max. Drehzahl	Geringe Baulänge	Große Hohlwelle	Korrosionsschutz
Servo Actuators	High torque capacity	Excellent accuracy	High dynamic performance	High maximum speed	Short axial length	Large hollow shaft	Corrosion protection
CHA	■■■	■■■	■■	■■■	■■■	■■■	■■■
CHM	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■	■■■
FHA-C	■■■	■■■	■■	■■	■■■	■■■	■■■
FHA-C mini	■■■	■■■	■■	■■■	■■■	■■■	■■
FFA	■■■	■■■	■■	■■	■■	—	■■■
FPA	■■	■	■■■	■■■	■■	—	■■■
PMA	■■■	■■	■■	■■	■	—	■■

Заслуживает внимания сервопривод CHA-20A [29], имеющий номинальный крутящий момент на выходе 32 Нм, максимальная скорость вращения 120 об/мин при габаритах Ø108x138 мм и массе 3,9 кг, напряжение питания 220...430 В, потребляемая мощность 260 Вт (рисунок 42). Привод содержит электродвигатель, волновую передачу, энкодер YukonDrive-1021 с

точностью позиционирования не хуже 1 угл. минуты и встроенный электромагнитный тормоз. На рисунке 43 показан сервопривод в разрезе. Такой привод выгодно отличается наличием отверстия $\varnothing 18$.

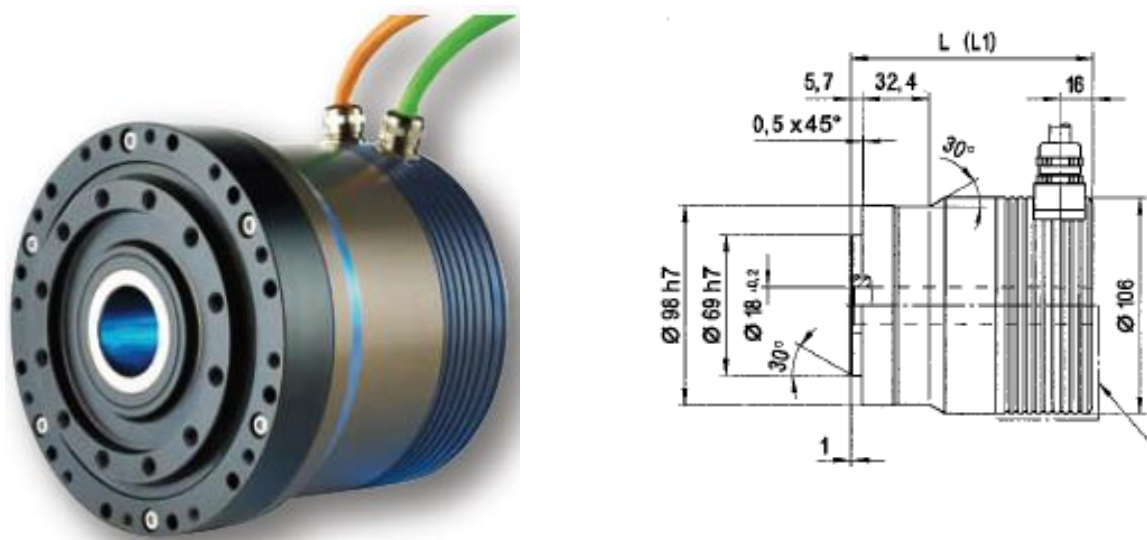


Рисунок 42 – Сервопривод СНА-20А: внешний вид и габаритный чертеж

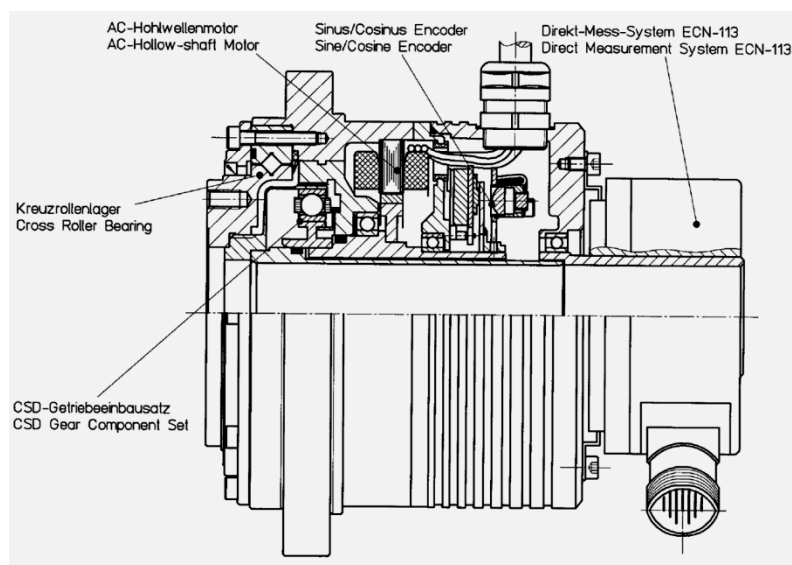


Рисунок 43 – Сервопривод СНА-20А (компоновочная схема)

Компания Harmonic Drive также производит также миниатюрные сервоприводы типа FNA-C mini. Привод FNA-8C-100-D200 имеет максимальную скорость 60 об/мин, номинальный момент 2 Нм, энкодер 800000 имп/об при массе 0,4 кг (рисунок 44).

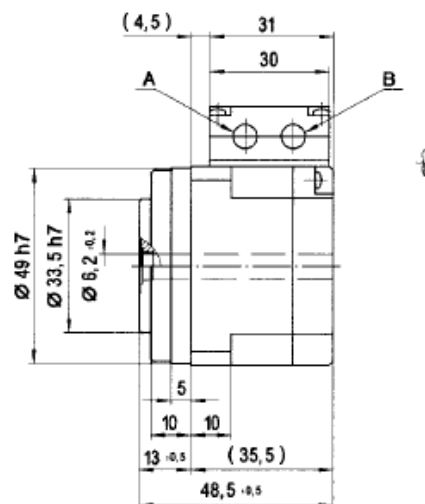


Рисунок 44 – Мини привод FNA-8C-100-D200

Эти приводы имеют отверстие на выходном валу $\varnothing 6$ для прокладки кабеля. По своим характеристикам он может подойти для модуля ротации схвата робота.

В ЦНИИ РТК разработан мехатронный электромеханический модуль (полезная модель РФ RU118483), состоящий из подвижного и неподвижного корпусов, содержащий встроенный волновой редуктор и низкооборотный бесконтактный моментный двигатель постоянного тока (рисунок 45). Модуль оснащен датчиками скорости двигателя, абсолютного отсчета положения подвижного корпуса, крутящего момента. Модуль оснащен датчиками температуры и нагревательными элементами для поддержания заданной температуры внутри модуля и расширения рабочего температурного диапазона, имеет улучшенные весогабаритные характеристики. Внутри корпуса модуля проложены провода информационного и питающего кабеля. Входной и выходной фланцы модуля с электрическими соединителями расположены на торцевой или боковой поверхностях модуля, что позволяет создавать и переконфигурировать многозвенные робототехнические устройства.

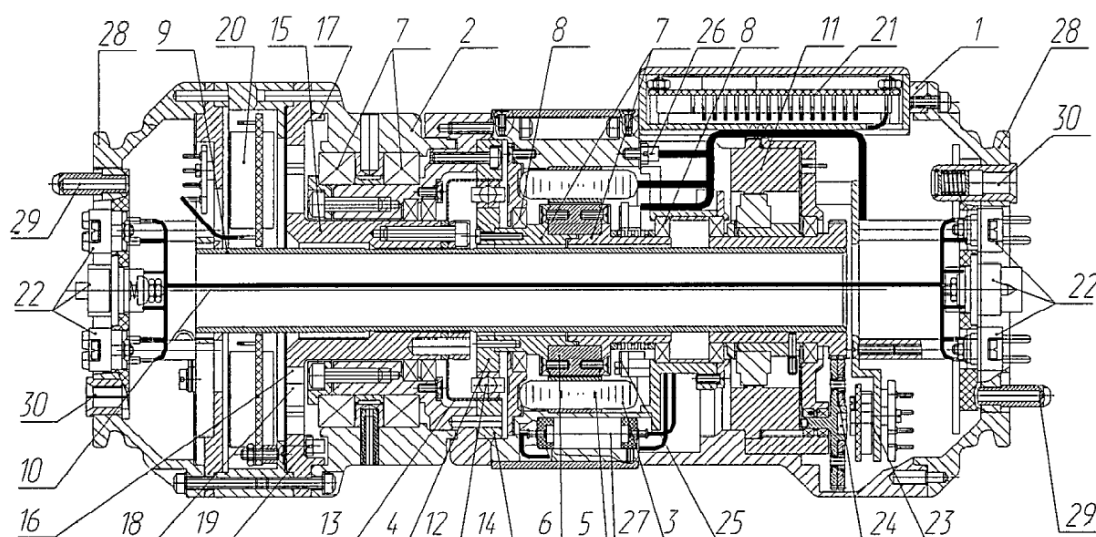


Рисунок 45 – Мехатронный электромеханический модуль

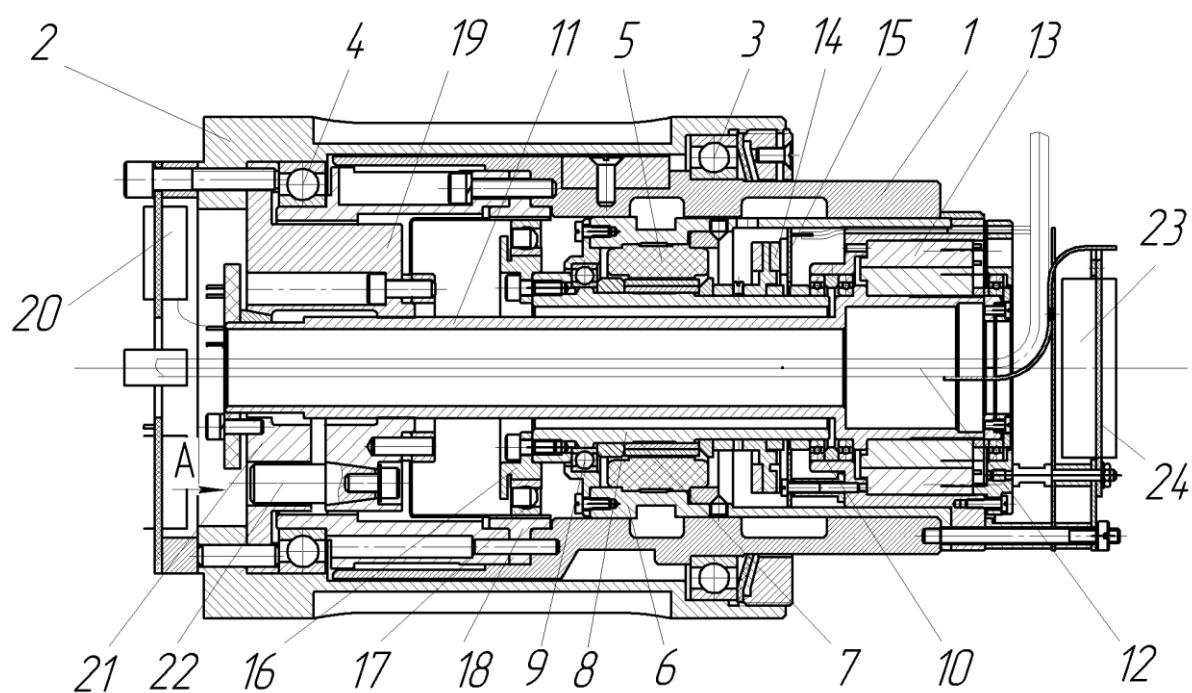
Применение микропроцессорного контроллера дает возможность адаптировать модуль к задачам управления разнообразными робототехническими устройствами на программном уровне, а интегрированный в контроллер CAN интерфейс, реализует распределенную систему управления от центрального компьютера изделием, состоящим из множества электромеханических модулей.

Недостатками указанного мехатронного модуля являются низкие надежность и точность отработки движений. Это связано с тем, что шарикоподшипники, на которых установлен подвижный корпус относительно неподвижного корпуса, расположены близко друг от друга, фактически они находятся на расстоянии, не превышающем длину внутреннего кольца датчика крутящего момента. В случае внешнего воздействия в виде изгибающего момента (например, при движении с ускорением или при касании с препятствием) теряется точность движения подвижного корпуса относительно неподвижного корпуса по причине низкой жесткости конструкции с близко расположенными подшипниками. Кроме этого, при внешнем изгибающем моменте происходит изгиб внутреннего кольца датчика крутящего момента, который передается на упругие спицы датчика момента, на которых установлены тен-

зорезисторы – чувствительные элементы датчика крутящего момента. Деформации тензорезисторов от действия изгиба влекут за собой искажение информации о крутящем моменте. Таким образом, данное техническое решение имеет пониженную точность и надежность электромеханического модуля в целом.

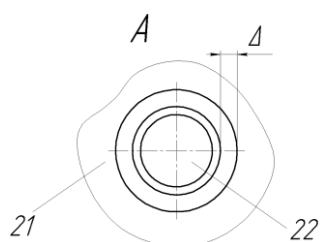
Свободной от указанных недостатков является конструкция поворотного электромеханического модуля (полезная модель РФ RU144518). Он также является мехатронным модулем и содержит неподвижный корпус 1, подвижный корпус 2, установленный при помощи шарикоподшипников 3 и 4 на неподвижном корпусе 1 (рисунок 46).

Подвижный корпус 2 приводится в движение бесконтактным низкооборотным моментным электродвигателем постоянного тока 5 через волновой редуктор. Статор двигателя 5 запрессован во фланце 6, который зафиксирован в неподвижном корпусе 1. Ротор двигателя 7 жестко закреплен на полом входном валу 8 волнового редуктора, вращающемся на двух шарикоподшипниках 9 и 10, расположенном соосно полуму выходному валу 11 подвижного корпуса 2, который служит для прокладки информационного и питающего кабеля 12 и соединенного с вращающимся трансформатором 13. На полом выходном валу волнового редуктора 8 закреплен также диск с магнитами 14, взаимодействующими с элементами Холла датчика поворота 15 ротора электродвигателя 7, который зафиксирован относительно неподвижного корпуса 1. Ротор двигателя 7 через полый выходной вал 8 волнового редуктора соединен с генератором волн 16 волнового редуктора, который деформирует гибкое зубчатое колесо 17, входящее в зацепление с жестким колесом 18 волнового редуктора, закрепленным в неподвижном корпусе 1.

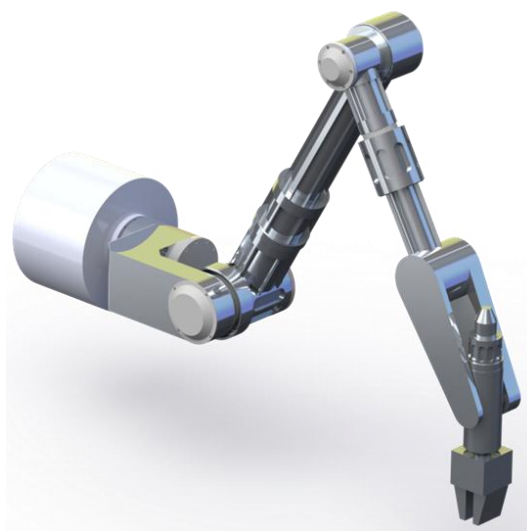


а

(увеличено)



б



в

Рисунок 46 – Поворотный электромеханический модуль: а – продольный разрез, б – вид по стрелке А, в – 3-D модель робота с поворотными электромеханическими модулями

Момент с гибкого зубчатого колеса 17 через внутреннее кольцо 19 датчика крутящего момента и через упругие спицы (на рисунке 46 а одна из них попала в сечение разреза), на которых расположены чувствительные элемен-

ты, соединенные с электронной платой 20, передается на внешнее кольцо 21 датчика крутящего момента, жестко соединенное с подвижным корпусом 2.

На внутреннем кольце 19 датчика крутящего момента закреплен по конической поверхности палец 22, который своей цилиндрической частью входит с радиальным зазором Δ в цилиндрическое отверстие внешнего кольца 21, причем ось пальца параллельна оси подвижного корпуса 2 (рисунок 46 б).

Контроллер 23 мехатронного электромеханического модуля установлен на печатной плате 24, закрепленной при помощи стоек на неподвижном корпусе 1.

Мехатронный электромеханический модуль работает следующим образом. При подаче от компьютера (верхний уровень управления) на контроллер 23 команд управления, содержащих, например, задания по величине угла поворота, скорости подвижного корпуса 2, по величине крутящего момента, приводится во вращение ротор двигателя 7, закрепленный на полом выходном валу 8, который вращает генератор волн 16, деформируя гибкое зубчатое колесо 17. Гибкое зубчатое колесо 17 входит в зацепление с жестким колесом 18, закрепленным в неподвижном корпусе 1, обкатывая его. Таким образом, происходит редуцирование скорости вращения гибкого зубчатого колеса 17 относительно генератора волн 16. Вращение гибкого зубчатого колеса 17 через внутреннее кольцо 19 и внешнее кольцо 21 датчика крутящего момента передается при помощи полого выходного вала 11 на вращающийся трансформатор 13, который формирует сигнал, пропорциональный абсолютному углу поворота подвижного корпуса 2. Этот сигнал поступает на контроллер 23, который вырабатывает управляющие сигналы для работы электродвигателя 5. Для переключения обмоток статора электродвигателя 7 в зависимости от угла поворота формируются сигналы датчика поворота 15 при вращении диска с магнитами 14 относительно элементов Холла, которые поступают также на контроллер 23.

Крутящий момент внешней нагрузки, приложенный к подвижному корпусу 2, передается от внешнего кольца 21 датчика крутящего момента на внутреннее кольцо 19, деформируя упругие спицы и воздействуя на чувствительные элементы на упругих спицах. Сигналы чувствительных элементов (например, тензорезисторов) измеряются и преобразуются в цифровую форму электронной платой 20 и далее по кабелю 12 передаются в контроллер 23.

При внезапном ударе, больших ускорениях или соприкосновении с препятствием подвижного корпуса 2 возникают изгибающие моменты, действующие на подшипники 3 и 4, установленные в неподвижном корпусе 1. При большой базе, т.е. при большом расстоянии между подшипниками 3 и 4, силовые реакции будут уменьшены по сравнению с прототипом, в котором эта база меньше, по крайней мере, в 3 раза. Повышенная жесткость заявляемого электромеханического мехатронного модуля позволяет повысить также и точность позиционирования и движений подвижного корпуса 2.

При указанной внешней нагрузке в виде изгибающего момента, деформация изгиба не передается на датчик крутящего момента и не оказывает влияние на показания чувствительных элементов датчика крутящего момента, так как контакт в зубчатом зацеплении гибкого зубчатого колеса 17 и жесткого колеса 18 находится примерно посередине между подшипниками 3 и 4. Такое решение повышает надежность модуля.

При внезапном ударе или при резком превышении допустимого значения момента внешней нагрузки, когда система управления не сможет отработать сигнал обратной связи от датчика момента, палец 22 сдвинется на величину зазора Δ и надавит на внутреннюю поверхность отверстия внешнего кольца 21. Таким образом, происходящее резкое угловое смещение внешнего кольца 21 относительно внутреннего кольца 19 будет ограничено зазором Δ между пальцем 22 отверстием во внешнем кольце 21. Тем самым предохранит чувствительные элементы датчика от повреждения и повысит надежность системы в целом.

Таким образом, рассмотренный электромеханический модуль поворота имеет повышенную надежность и точность позиционирования.

Швейцарская фирма Maxon motor AG [30] поставляет на рынок большой спектр сервоприводов, причем отдельные модули электродвигателей с тормозами, планетарных редукторов и сенсоров можно соединять в различной конфигурации благодаря унификации элементов соединения. Например, электродвигатель (ЕС-4pole 32, Ø32 мм, 480 Вт, с датчиками Холла) может быть состыкован с планетарным редуктором (GP 32 HD, Ø32 мм, 3.0 - 8.0 Нм).

В сервоприводе (рисунок 47) сателлиты 1 двухступенчатого планетарного редуктора взаимодействуют с общим неподвижным колесом, нарезанном на внутренней поверхности втулки 2. Сателлиты установлены в опорах на пальцах водил 3. Левое водило связано с выходным валом 4 редуктора на подшипниках 5 в переднем фланце 6 редуктора. Ведущая быстроходная шестерня 7 выполнена зацело с валом 8 мотора постоянного тока с полый обмоткой 9 ротора (без вращающегося магнитопровода). На этом же валу установлен коллектор 10 и оптический датчик обратной связи по углу 11. Корпус двигателя 12, выполняющий функции магнитопровода, соединен с двигателем адаптером 13. Адаптер служит для приспособления редуктора к соединению с различными типоразмерами двигателей. Передний фланец 14 корпуса двигателя с подшипником 15 несет постоянные магниты 16 полюсов статора. Питание ротора двигателя осуществляется через щетки 17 в пазах 18.

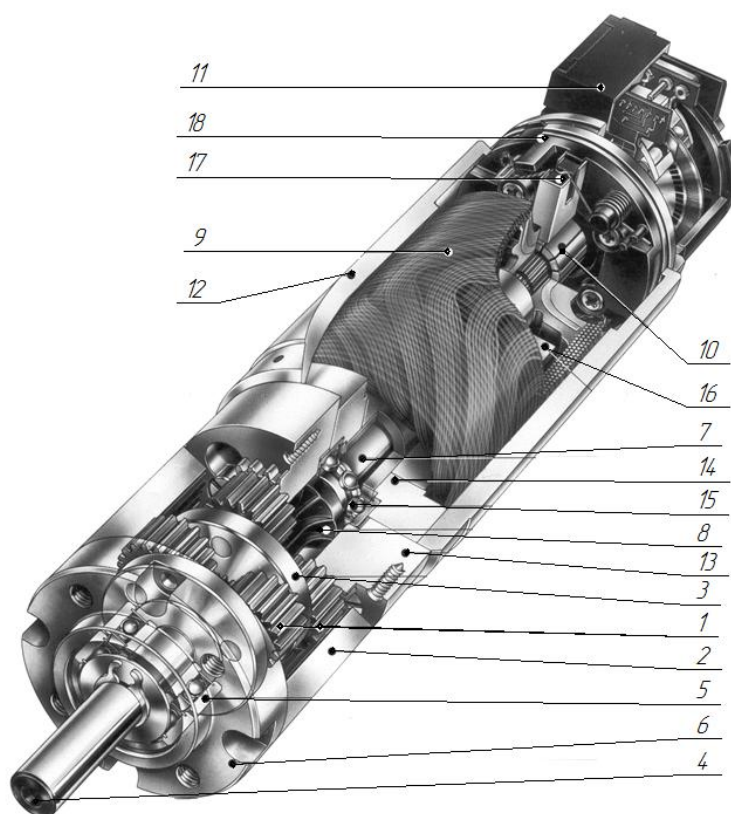


Рисунок 47 – Сервопривод фирмы «maxon motor ag»

Планетарные редукторы отличаются многопоточной передачей момента, что обеспечивает их большую компактность по сравнению с обычными зубчатыми передачами (при сходной нагрузочной способности). Многопоточность эффективна при повышенной точности изготовления передач.

5 ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ УП

5.1 Электродвигатели

ОАО «Электроприбор» освоило ряд бесконтактных высокомоментных электродвигателей постоянного тока [31].

Бесколлекторные индукторные моментные двигатели постоянного тока с электромагнитной редукцией частоты вращения ротора и с возбуждением от высококоэрцитивных постоянных магнитов предназначены для приме-

ния в безредукторных цифровых и аналоговых электроприводах и в следящих системах неограниченного угла поворота ротора, и работают совместно с цифровым контроллером или электронным транзисторным коммутатором.

МД выполняются в виде кольцевых зубчатых статора и ротора. На статоре расположена трехфазная силовая обмотка управления. На роторе установлены постоянные высококоэрцитивные магниты, расположенными на роторе и выполненными в виде колец из редкоземельного материала (рисунок 48). В качестве датчика положения предпочтительно использовать индукционные первичные преобразователи и датчики угла, относящиеся к классу вращающихся трансформаторов. Имеет номинальный момент 0,8 Нм при номинальной скорости 17 об/мин при габаритах Ø71x45 и массе 0,63 кг.

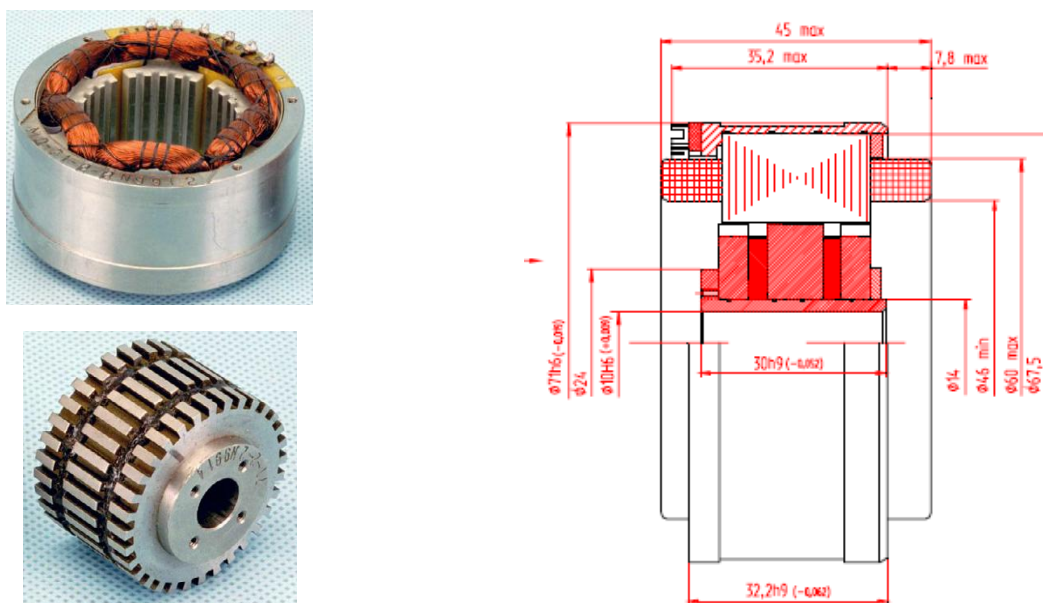


Рисунок 48 – Моментный двигатель МД 71-2

Эти низкооборотные высокомоментные двигатели используются без редукторов, однако имеет низкий крутящий момент для нашего применения.

Швейцарская компания Maxon motor также производит компактные высокомоментные двигатели [32]. Близкие по требуемым параметрам электродвигатель ЕС 90 имеет мощность 90 Вт при габаритах Ø90x28 мм и массе 0,6 кг, номинальную скорость 1640 об/мин, момент ном. 0,5 Нм (рисунок 49).

Однако все конструкции электродвигателей этой фирмы не имеют центрального отверстия, что не позволяет размещать кабель по центру конструкции.

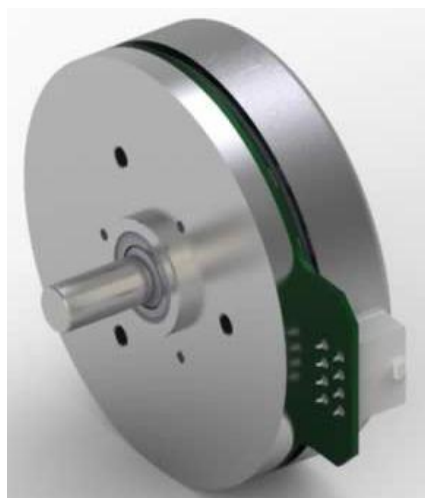


Рисунок 49 – Электродвигатель ЕС 90 фирмы Maxon motor

Благодаря применению патентованных технологий и разработок компании maxon motor (полый ротор и валы специальной конструкции, использование особых сплавов и материалов, технология CLL) обеспечивается низкая инерционность и большое ускорение двигателей, низкий уровень электромагнитных помех и малая величина индуктивности, максимально возможная линейность нагрузочных характеристик и высший КПД. Двигатель состоит из статора, ротора, коллектора (щеточно-коллекторного узла), постоянного магнита, вала, подшипников скольжения и/или качения, корпуса. Основным отличием двигателя maxon motor от обычного аналога является специальная (запатентованная) конструкция полого ротора (рисунок 50).

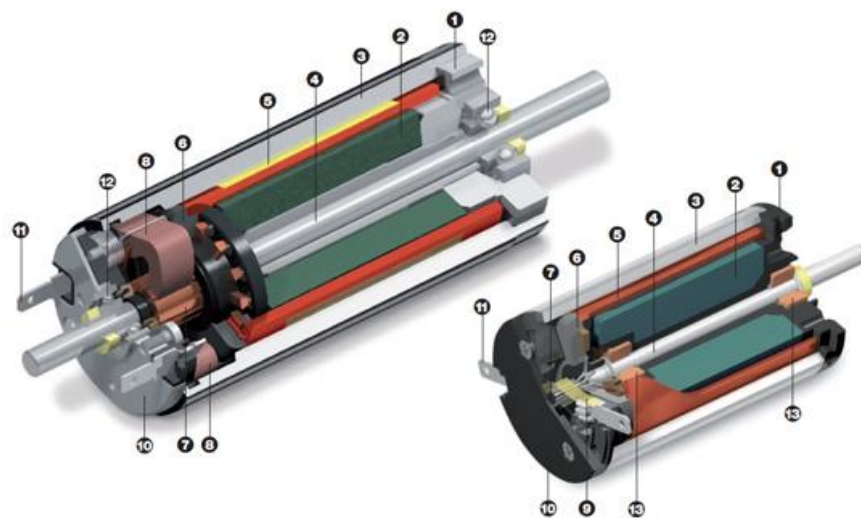


Рисунок 50 – Коллекторный электродвигатель постоянного тока: 1 - фланец, 2 - постоянный магнит, 3 – корпус, 4 – вал, 5 – обмотка, 6 - плата коллектора, 7 – коллектор, 8 -графитовые щетки, 9 - щетки из благородных металлов, 10 – кожух, 11 - электрический контакт, 12 - шариковый подшипник, 13 - металлокерамический подшипник скольжения

Достоинства DC-двигателей Махон motor:

- полый ротор (малоинерционный) обеспечивает для мотора высокое ускорение и возможность останавливаться в любом положении;
- нет потерь мощности и магнитного насыщения в стальном сердечнике, что обеспечивает высокий КПД (до 90 %);
- линейные характеристики мотора, простота реализации управления.

Недостатки состоят в следующем. Имея в своем составе механический щеточно-коллекторный узел, щетки которого даже при исполнении из самых прочных материалов со временем истираются, двигатель обладает меньшей долговечностью службы, нежели двигатели бесколлекторного исполнения.

Для уменьшения искрения щетки изготавливают из графита и благородных металлов. Для уменьшения искрения при коротком замыкании применяется CLL-технология. Между соседними сегментами коллектора устанавливаются емкости, в которые отклоняется избыток энергии, и как следствие, не происходит дугового электрического разряда.

В таблице 6 приведены параметры маломощных коллекторных двигателей Maxon motor.

Таблица 6 – Параметры коллекторных двигателей Maxon motor

Серия мотора	F	S, A, A-max	RE, RE-max
Магнит	феррит	сплав AlNiCo	сплав NdFeB
Мощность	3 Вт	2.5 Вт	3 Вт
Объем мотора	23.3 см ³	8.2 см ³	4.6 см ³
Диаметр	30 мм	19 мм	13 мм
Длина	33 мм	29 мм	34.5 мм
Момент	3.3 мНм	4.4 мНм	3 мНм

Отдача энергии осуществляется медленно, происходят затухающие колебания, что сводит к минимуму вероятность резких скачков напряжения (основной причины появления искрения).

Германская компания TQ-Systems GmbH выпускает большой спектр бесколлекторных бескорпусных электродвигателей постоянного тока без подшипниковых узлов, которые встраиваются в корпуса мехатронных модулей с обеспечением высокой точности в осевом направлении [33]. Эти двигатели имеют относительно большие центральные отверстия в роторе для прокладки кабеля. По своим удельным характеристикам они стоят на уровне лучших мировых образцов благодаря применению редкоземельных постоянных магнитов, установленных в виде набора прямоугольных пластин на роторе (рисунок 51).



Рисунок 51 – Электродвигатель ILM 70x18

Электродвигатель ILM 70x18 имеет номинальный момент 1,25 Нм и мощность 370 Вт, скорость 2200 об/мин при габаритах $\varnothing 70 \times 28$ мм массе 0,34 кг .

Анализ приведенных выше электродвигателей позволяет сделать вывод, что наиболее подходящим электродвигателем, который может быть установлен в модулях поворота звеньев робота, является двигатель компании TQ-Systems GmbH.

5.2 Датчики УП

В соответствии с ТЗ максимальная погрешность датчика углового положения должна быть не хуже $\pm 0,5$ мм на плече 0,75 м, т.е. в угловых координатах $\pm 0,66 \times 10^{-3}$ рад. $\approx 0,0380$ или $\pm 10^{-4}$ часть окружности; для датчиков крутящего момента максимальная погрешность не хуже 1,0 Н на плече 0,75 м, т.е. – 0,75 Нм. Исходя из указанных параметров, в этом разделе рассматриваются такие типы датчиков, которые близки к указанным параметрам.

При разработке подсистемы очувствления и управления для применения в робототехнике следует учитывать следующие моменты:

Датчики момента монтируются в шарнирах сочленений и на захватном устройстве манипулятора. При этом должно быть минимизировано влияние упругости гибкого звена датчиков на частоту собственных колебаний узлов робототехнической системы.

Установка аппаратуры датчиков должна производиться по возможности с минимальными изменениями в конструкции шарниров.

Важным фактором является снижение массогабаритных параметров датчиков.

Регистрирующие устройства датчиков момента должны обладать высоким коэффициентом использования диапазона деформаций упругих элементов для обеспечения приемлемого отношения сигнал/шум.

Конструкция датчика должна обеспечивать выделение основной компоненты вектора измеряемого момента, при этом влияние сторонних компонентов нагрузки должно быть исключено.

Характеристики датчика должны быть максимально приближены к линейным. Датчик должен быть прост в изготовлении и надежен.

Рассмотрим варианты датчиков сил и моментов, которые могут найти применение при разработке подсистемы очувствления роботов, предназначенных для автономной работы в недетерминированной окружающей среде.

Тензометры сопротивления хорошо известны и широко применяются для измерения деформаций, в том числе и в преобразователях для измерения крутящего момента.

Преимущества тензометрических преобразователей:

- малые размеры;
- отсутствие сложных механических конструкций;
- небольшая база измерений.

Тензорезистивный эффект – это свойство проводниковых и полупроводниковых материалов изменять свое электрическое сопротивление при деформировании. Электрическое сопротивление тела при деформировании из-

меняется как за счет изменения его геометрических размеров, так и за счет изменения удельного сопротивления материала. В случае одноосного напряжения (например, растяжения), относительное изменение сопротивления $\Delta R/R$ элемента длиной l с удельным сопротивлением ρ и коэффициентом Пуассона μ будет иметь вид

$$\Delta R/R = (1 + 2\mu)dl/l + d\rho/\rho.$$

В уравнении первый член определяет изменение геометрии тела, а второй – изменение удельного сопротивления. При типичных значениях коэффициента Пуассона $\mu \leq 0,5$ приращение сопротивления за счет геометрии не превышает $2dl/l$. Относительное изменение сопротивления при единичной деформации $d\rho/\rho$ называют тензосопротивлением. У металлов тензоэффект примерно равен 0,3, и коэффициент тензочувствительности, определяемый как $\Delta R/R$ при единичной деформации, примерно равен 2. Однако в полупроводниковых тензорезисторах, использующих в качестве материала кремний, германий и полупроводниковые соединения группы $A^{III}B^V$, такие, как GaAs, GaP, GaSb, SnSb, значение тензочувствительности лежит в пределах $50 \div 150$. У полупроводниковых датчиков есть следующие достоинства:

- чувствительные элементы легко могут быть сконструированы для определенных применений так, чтобы обеспечить максимальную чувствительность;
- просто решается задача миниатюризации;
- есть возможность использовать устройства на основе кремния p- и n-типов, имеющие противоположные знаки тензоэффекта.

Наибольшим недостатком полупроводниковых тензорезистивных приборов является их значительная температурная чувствительность. Эта зависимость уменьшается с увеличением уровня легирования, но при легировании снижается и тензоэффект. Возможны также флуктуации сопротивления чувствительного элемента в недеформированном состоянии за счет высокого

температурного коэффициента сопротивления. Однако оба эти эффекта могут быть минимизированы с использованием компенсаторных схем.

Устройство мехатронного датчика крутящего момента для промышленного и лабораторного применения представлено на рисунке 52 .

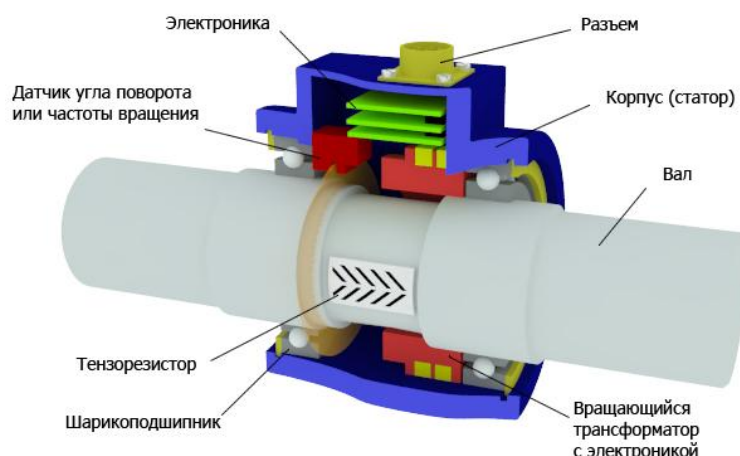


Рисунок 52 – Мехатронный датчик крутящего момента

Тензорезисторы наклеиваются на суженное место на валу. На валу также находится электроника. На корпусе располагается дополнительная электроника и разъем для электрического подключения датчика. Для передачи сигнала и энергии служат два вращающихся трансформатора, состоящих из двух расположенных concentric друг к другу катушек. При этом одна катушка закреплена на роторе, а другая — на статоре. При опции «частота вращения» или «угол поворота» присутствует генератор импульсов.

Пьезоэлектрические датчики крутящего момента содержат один или два пьезодатчика силы, установленных между полумуфтами первичного и вторичного валов, через которые передается момент сил. По измеряемой силе и известному радиусу его установки определяется величина крутящего момента. основаны на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, состоящего в том, что при давлении на некоторые кристаллические тела, называемые пьезоэлектриками, на поперечных гранях этих тел возникают элек-

трические заряды, т.е. ЭДС постоянной полярности. Если не сжимать, а растягивать пьезоэлектрик, то ЭДС изменяет полярность.

Пьезоэлектрики также обладают обратным пьезоэффектом — от воздействия ЭДС пьезоэлементы упруго расширяются или сжимаются в зависимости от полярности ЭДС. В практике используют пьезоэлементы в виде прямоугольных или круглых пластинок, цилиндров и колец, вырезанных с учетом осей кристаллов. Пьезоэлектрический датчик силы содержит два пьезоэлемента, повернутых так, что на разделяющей их прокладке из металлической фольги образуются положительные заряды относительно металлического корпуса при давлении силы F на плунжер датчика. Пьезоэлементы включены параллельно, что вдвое повышает мощность выходного электрического сигнала, но из-за большого внутреннего сопротивления кристаллов для получения достаточного выходного тока применяют электронные усилители с высоким входным сопротивлением.

Разновидностью пьезоэлектрических датчиков сил и моментов служит пьезодатчики, в которых определяется изменение собственной частоты при приложении сил или моментов.

Струнные преобразователи крутящего момента являются датчиками, основанными на изменении частоты колебаний. Высокая добротность колебательной системы струнных преобразователей позволяет получить высокую точность измерения усилий. При использовании струнных преобразователей для измерения крутящего момента значительно упрощаются требования к устройству связи с вращающимся валом из-за высокой помехоустойчивости (особенно к помехам мультипликативного типа), устройств с частотной модуляцией.

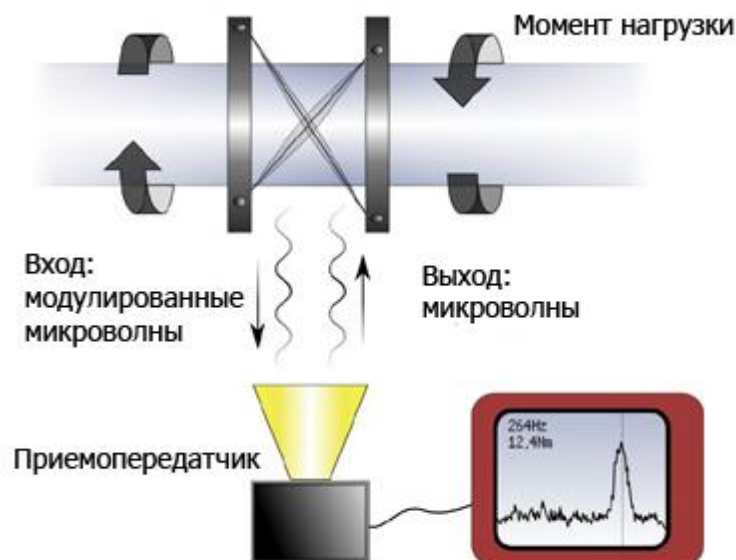


Рисунок 53 – Принцип действия струнного преобразователя

В простейшем струнном преобразователе (рисунок 53) на валу укреплены два кронштейна, между которыми вдоль оси измеряемых напряжений натягиваются стальные струны. При появлении деформации под действием приложенного момента кронштейны перемещаются и изменяют натяжение струны. При изменении натяжения струны изменяется частота её колебаний, измеряемая электромагнитным датчиком.

Применение струнных преобразователей позволяет получить достаточно жесткую конструкцию упругого звена, максимальный угол закручивания которого не превосходит $0,5-0,3^\circ$. Конструкции струнных датчиков характеризуются высокой чувствительностью и малой инерционностью, их погрешность в условиях эксплуатации (при действии комплекса влияющих факторов) не превышает $\pm 0,4\%$.

В основу построения магнитоупругих преобразователей положен магнитоупругий эффект, проявляющийся в изменении магнитных свойств ферромагнитных материалов под действием механических напряжений. Различают две основные группы магнитоупругих преобразователей. К первой группе относятся преобразователи, в которых используется изменение маг-

нитных свойств материала в одном или двух взаимно перпендикулярных направлениях. Примерами таких преобразователей могут служить дроссельный и трансформаторный преобразователи, приведенные на рис. 54 а, б.

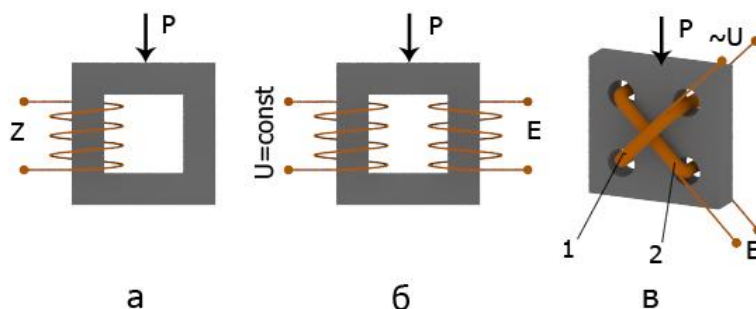


Рисунок 54 – Разновидности магнитоупругих преобразователей

В первом преобразователе функцией приложенной силы P является полное электрическое сопротивление Z , во втором – ЭДС E , наводимая во вторичной обмотке. Ко второй группе относятся преобразователи, в которых используется изменение степени магнитной анизотропии материала. В магнитоанизотропном датчике (рис. 54, в) в исходном (ненапряженном) состоянии суммарный вектор магнитного потока, создаваемого обмоткой возбуждения 1, направлен вдоль витков измерительной обмотки 2, расположенной перпендикулярно оси обмотки возбуждения. При этом пересечения витков измерительной обмотки потоком не происходит, т.е. связь между обмотками отсутствует. В нагруженном состоянии вследствие анизотропии магнитных свойств материала магнитное поле обмотки возбуждения деформируется, и появляется составляющая магнитного потока, сцепляющаяся с витками измерительной обмотки.

Магнитоупругий преобразователь кольцевого типа фирмы Lebow Products Inc [34], показанный на рисунке 55, состоит из трех колец: на среднем расположены обмотки, создающие магнитный поток, на крайних — измерительные обмотки. Среднее кольцо наполовину шага сдвинуто по отношению к крайним. У кольцевого торсиометра пульсации выходного напря-

жения при медленном вращении вала, вызванные его анизотропией, могут быть сделаны менее 0,5 %. Это объясняется тем, что у кольцевого торсиометра измерение механического напряжения проводится одновременно по всей окружности вала, в отличие от перекрестных торсиометров, в которых производятся последовательные измерения на участках окружности.

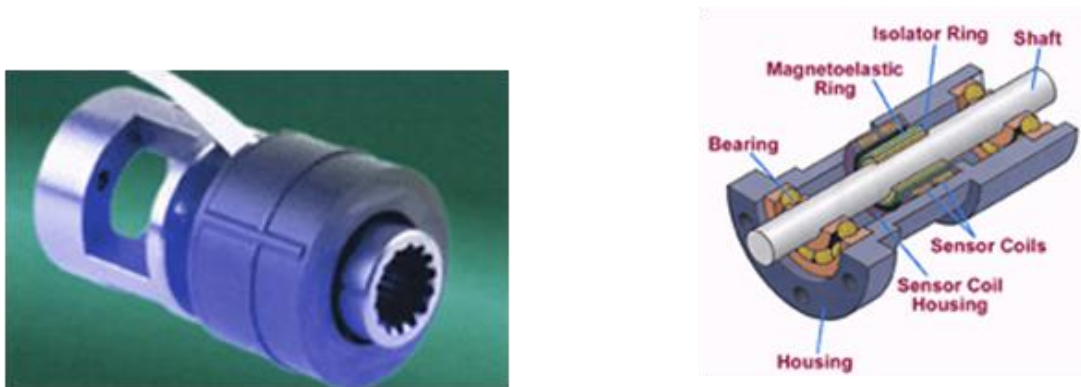


Рисунок 55 – Магнитоупругий преобразователь Torqstar

Существенное влияние на метрологические характеристики магнитоупругих преобразователей оказывают механический гистерезис, являющийся следствием упругого последействия, и магнитный гистерезис. Уменьшения механического гистерезиса можно достичь методами, аналогичными методам стабилизации характеристик упругих элементов. Уменьшение магнитного гистерезиса проводится путем подбора материала с узкой петлей гистерезиса. Для стабилизации характеристик магнитоупругого преобразователя во времени применяют естественное и искусственное старение и термообработку.

Основные преимущества магнитоупругих приборов:

- простота постановки на свободные участки вала без дополнительных переделок;
- небольшая измерительная база;
- отсутствие скользящих контактов;
- значительная мощность выходного сигнала при малом внутреннем сопротивлении, что облегчает проблему защиты от помех и наводок силовой-

го оборудования и дает возможность снятия показаний без дополнительного усиления;

- возможность проводить калибровку кольцевых торсиометров на неподвижном валу.

В *фотоупругих преобразователях* используется зависимость двойного лучепреломления некоторых изотропных веществ, например синтетических смол, от их деформации, вызванной внешними силами. Тонкие пленки таких смол хорошо сцепляются с металлом и деформация их, таким образом, соответствует деформации поверхностного слоя металлической детали.

В приборах для измерения крутящего момента тонкий слой вещества с двойным лучепреломлением наносится на упругий вал в виде кольца постоянной толщины. Измерение деформации, пропорциональной приложенному моменту, производится по изменению прошедшего через вещество и отраженного от поверхности упругого вала светового потока, направленного в виде узкого луча на поверхность кольца.

Фотоэлектрические преобразователи для измерения крутящего момента имеют более сложную конструкцию по сравнению с фотоупругими преобразователями. Большинство фотоэлектрических преобразователей имеет следующую конструкцию: на валу, подвергаемом скручиванию, устанавливаются на некотором расстоянии два диска с прорезями. По одну сторону дисков располагается источник света, по другую – фотоэлементы (рисунок 56).

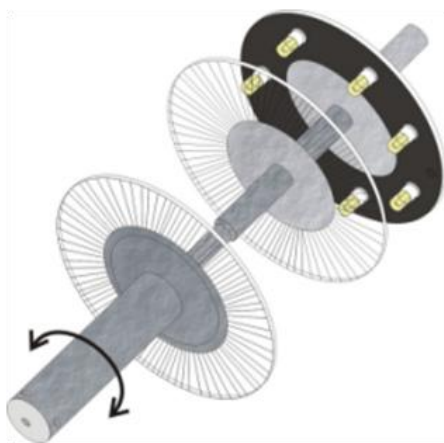


Рисунок 56 – Фотоэлектрический преобразователь E200 Optical Series: принцип действия и внешний вид

Изменение угла закручивания вала приводит к изменению размеров светового окна, образуемого прорезями обоих дисков, и, следовательно, светового потока, попадающего на фотоэлементы. Величина тока на выходе фотоэлементов служит, таким образом, мерой приложенного момента. Английская фирма Sensor Technology Ltd разработала серию таких оптических датчиков крутящего момента E200 Optical Series [35] в диапазоне моментов от 10 мНм до 500 Нм.

Компания SHUNK [36] выпускает серию силомоментных датчиков FTC-050. Датчик FTC-050-80 измеряет 6 компонентов напряженного состояния: $F_{x, y, z}=300$ Н, $M_{x, e, z}=7, 7, 15$ Нм (рисунок 57), его масса 1,6 кг. Датчики монтируются последовательно в цепи модулей робота.

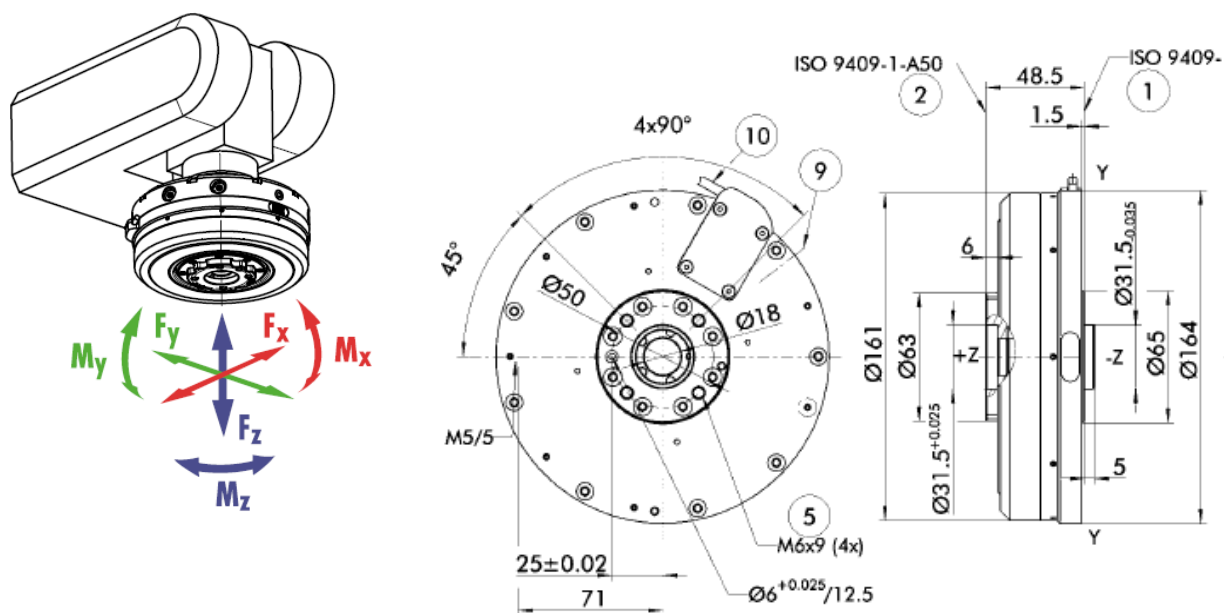


Рисунок 57 – Виды силовых компонентов, измеряемых датчиками FTC-050, и габаритный чертеж

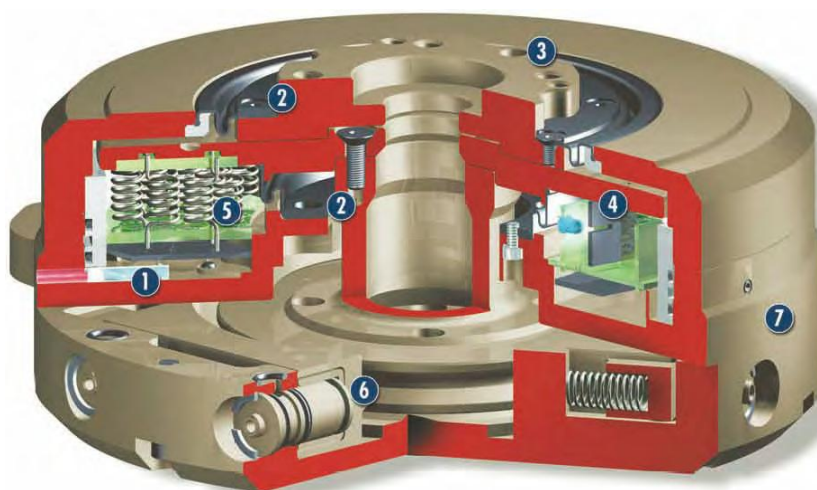


Рисунок 58 – Датчик серии FTC-050: 1 – оптоволоконный канал, 2 – защитный сильфон, 3 – монтажный фланец, 4 – оптический сило-моментный датчик и его контроллер, 5 – блок пружин, 6 – пневматический фиксатор, 7 – корпус из алюминиевого сплава

Силомоментные датчики серии FT-Omega-160 выгодно отличаются от датчиков FTC-050 тем, что выдерживают перегрузки в 14 раз большие по отношению к диапазону измеряемых нагрузок (рисунок 59). Измерительный сигнал устойчив к помехам за счет использования полупроводниковых

(кремниевых) тензодатчиков. Кремниевые тензодатчики обеспечивает сигнал, который в 75 раз выше, чем у обычных проволочных тензодатчиков. Вес датчика, выполненного из стали, - 2,7 кг.

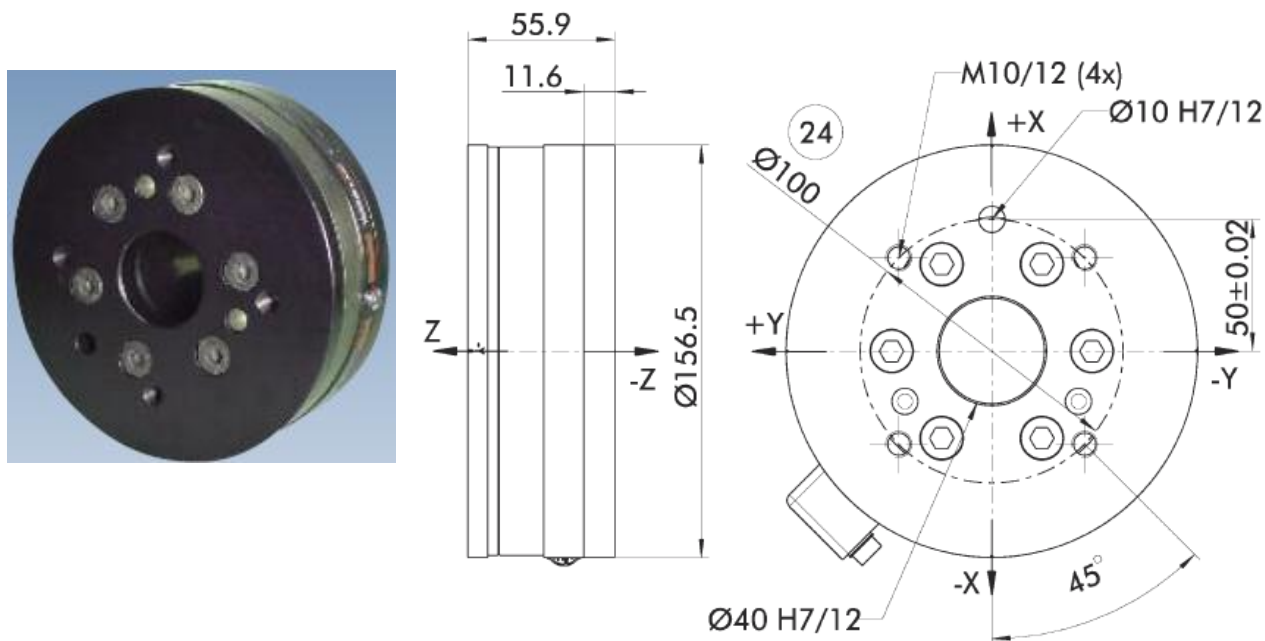


Рисунок 59 – Силомоментный датчик серии FT-Omega-160

Германская компания Kistler Holding AG [37] производит кварцевые (пьезоэлектрические) датчики крутящего момента и сил (рисунок 60).

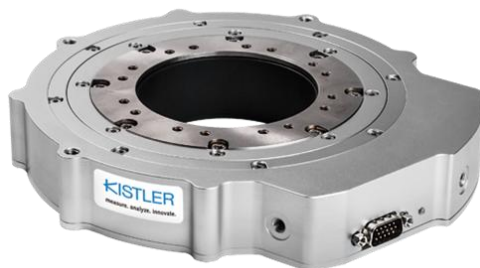


Рисунок 60 – Датчик крутящего момента типа CMSWB

Кварцевый динамометр крутящего момента типа CMSWB для измерения момента, действующего вокруг оси датчика. Компактный динамометр

отличается высокой жёсткостью и как следствие высокой собственной частотой, позволяющей измерять динамические отклонения крутящих моментов в диапазоне $0 \dots \pm 20$ Нм до $0 \dots \pm 200$ Нм

В научно-учебном центре «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан «интеллектуальный» силомоментный датчик (СМД) с электромеханическим разделением компонент. Датчик предназначен для использования в робототехническом комплексе раскроя листового металла и закреплён в запястье робота (рисунок 61) [38].

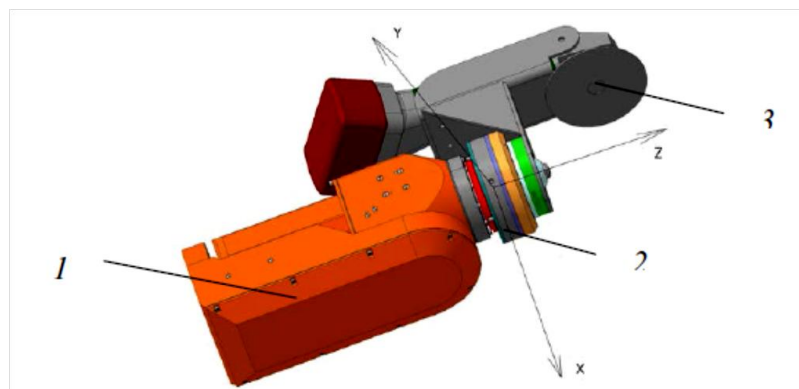


Рисунок 61 – Схема установки СМД: 1 – конечное звено робота, 2 – СМД, 3 – отрезная машина

Механический преобразователь СМД выполнен по схеме «мальтийский крест» с четырьмя упругими элементами, что позволяет измерять три компоненты вектора силы и три компоненты вектора момента в системе координат, связанной с геометрическим центром датчика (точка 0 на рисунке 62).

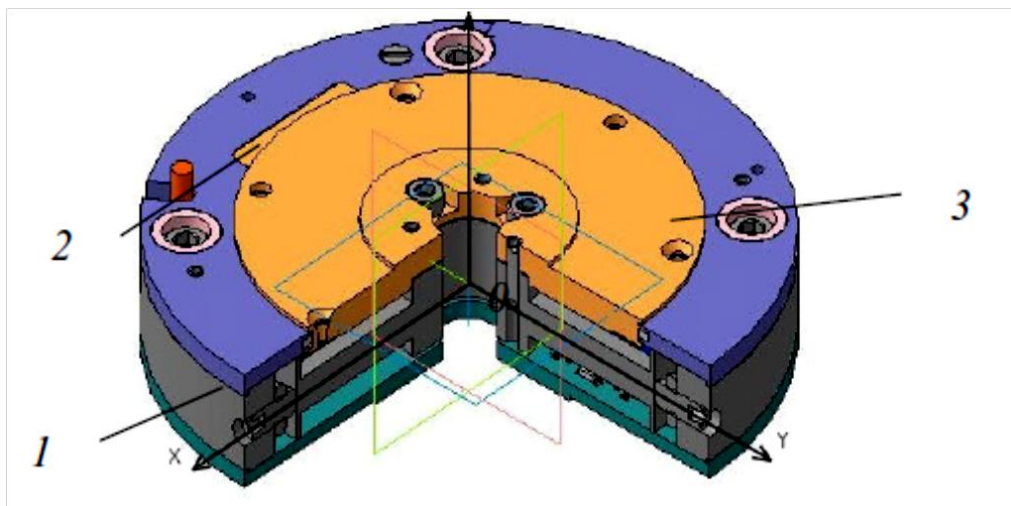


Рисунок 62 – Конструктивная схема СМД: 1 – корпус, 2 – механические ограничители нагрузки, 3 – фланец запястья

Внешний вид датчика СМД показан на рисунке 63.

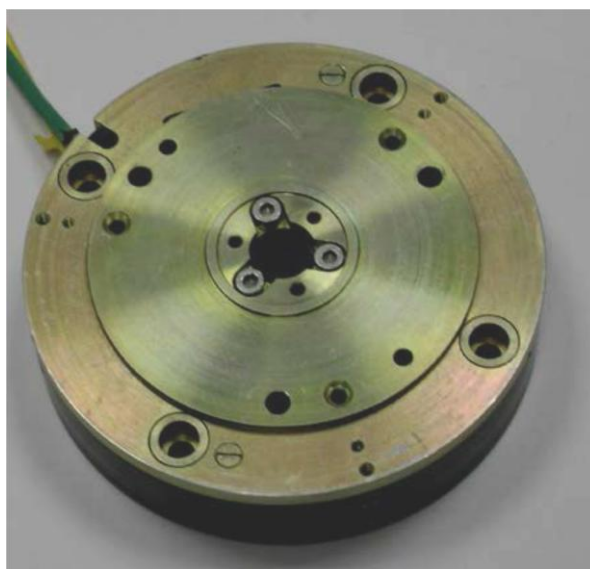


Рисунок 63 – Внешний вид СМД

Сенсорный контроллер, построенный на базе цифрового сигнального процессора производит оцифровку и дальнейшую обработку цифрового сигнала, выполняя следующие функции:

- фильтрация и сглаживание сигнала;
- вычисления в режиме повышенной точности;
- распознавание текущего тактильного образа;
- обмен командами с устройством управления робота.

При разработке подсистемы очувствления и управления для применения в робототехнике следует учитывать следующие моменты.

Датчики момента монтируются в шарнирах сочленений и на захватном устройстве манипулятора. При этом должно быть минимизировано влияние упругости гибкого звена датчиков на частоту собственных колебаний узлов робототехнической системы.

Установка аппаратуры датчиков должна производиться с минимальными изменениями в конструкции шарниров и захватных устройств.

Важным фактором является снижение массогабаритных параметров датчиков.

Регистрирующие устройства датчиков момента должны обладать высоким коэффициентом использования диапазона деформаций упругих элементов для обеспечения приемлемого отношения сигнал/шум.

Конструкция датчика должна обеспечивать выделение основной компоненты вектора измеряемого момента, при этом влияние сторонних компонентов нагрузки должно быть исключено. Характеристики датчика должны быть максимально приближены к линейным. Датчик должен быть прост в изготовлении и надежен.

Для датчика угла поворота (ДУП) выходного звена в соответствии с ТЗ его размеры должны вписываться в габариты $\varnothing 90 \times \varnothing 70 \times 22$ мм. Максимальная погрешность измерения угла поворота - $(\pm 0,05 \dots 0,2$ мм на плече 0,75 м), $\pm 0,66 \times 10^{-3}$ рад. $\approx 0,038^\circ$ или $\pm 10^{-4}$ часть окружности или 10^4 точек/оборот, т.е. в двоичном коде разрядность не менее 14 (2^{14}). (Для справок: 1" соответствует $1,3 \times 10^6$ точек/оборот, 6" соответствует 22 разряду двоичной системы). Учитывая, что погрешность самого ДУП должна примерно быть на порядок меньше, то разрядность ДУП должна соответствовать 16...17 разрядов.

ДУП можно отнести к более широкому классу – датчикам положения. По физическому принципу действия их можно классифицировать следующим образом:

- емкостные;
- индуктивные;
- индукционные;
- магнитоэлектрические;
- оптические;
- потенциометрические;
- ультразвуковые.

По точности определения угла поворота (положения) наиболее точными являются оптические, индукционные и магнитоэлектрические. В условиях открытого космоса (радиация, большой перепад температур) наиболее надежными являются индукционные и индуктивные.

Компания Renishaw в сотрудничестве со своей ассоциированной компанией RLS, разработала серию устойчивых к внешним воздействиям магнитных поворотных энкодеров для обеспечения точной обратной связи по позиционированию. AksIM™ – это бесконтактный внеосевой абсолютный поворотный энкодер, обладающий высокими эксплуатационными качествами и предназначенный для установки в условиях ограниченного пространства [39]. Компактная и низкопрофильная считывающая головка детектирует изменения напряженности магнитного поля тонкого кольца, намагниченного в направлении оси, и обрабатывает полученные данные. Для кольца диаметром 80 мм поддерживается 262 144 точек отсчета на оборот с разрешением 18 бит (рисунок 64 а, б), масса датчика 1,5 кг.



a

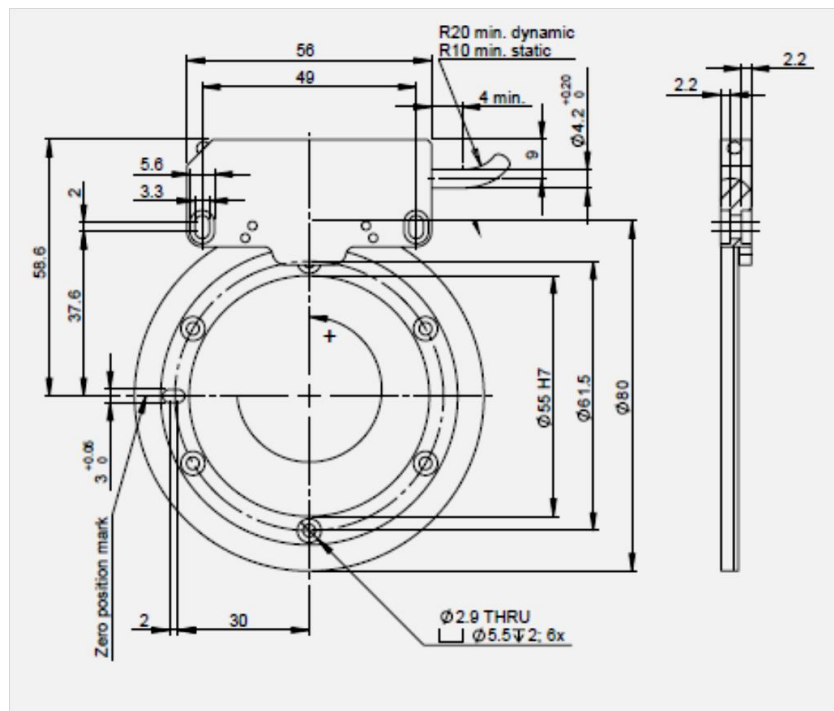


Рисунок 64 – Бесконтактный магнитный абсолютный поворотный энкодер AksIM™ : а – внешний вид, б – габаритный чертеж

Ближкие характеристики имеют высокоточные датчики – угловые абсолютные энкодеры REXA 39U S A 075 В компании Renishaw.

Такие датчики при высокой точности имеют относительно большое центральное отверстие для прокладки кабеля и иных устройств, однако, считывающая головка, расположенная сбоку от кольца, плохо вписывается в габариты руки робота.

Индукционные датчики угла поворота с плоскими печатными обмотками на торцах диэлектрических шайб, называемые индуктосинами, имеют аналогичный физический принцип, что и ВТ. Производились в СССР в 80-х годах, например, ПИКП1-А3 (СКБ прецизионных станков) с погрешностью ± 6 угловых секунд. Сейчас более 30 % станков с ЧПУ оснащены индуктосинами.

Из зарубежных фирм наиболее известная американская компания Far-
rand Controls выпускает индуктосины – вращательные абсолютные датчики
углового положения с точностью $\pm 0,5$ угл. сек при габаритах

Ø100x Ø25x8 мм (рисунок 65) [40].

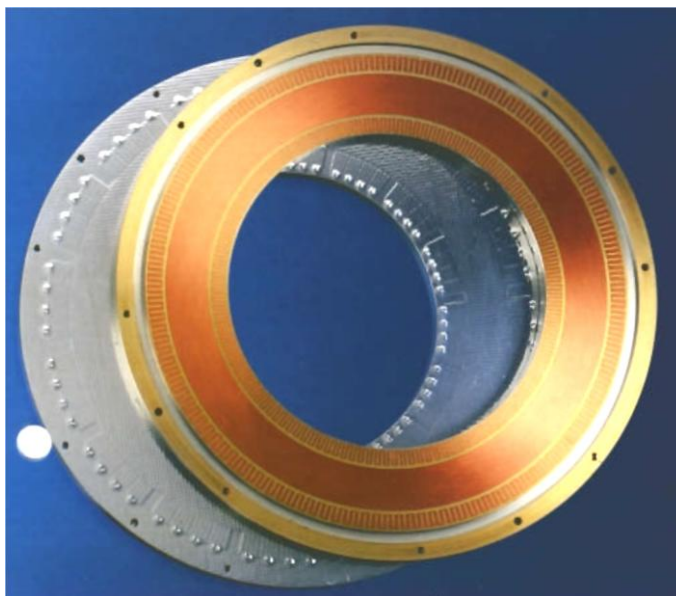


Рисунок 65 – Датчик Inductosyn® компании Farrand Controls

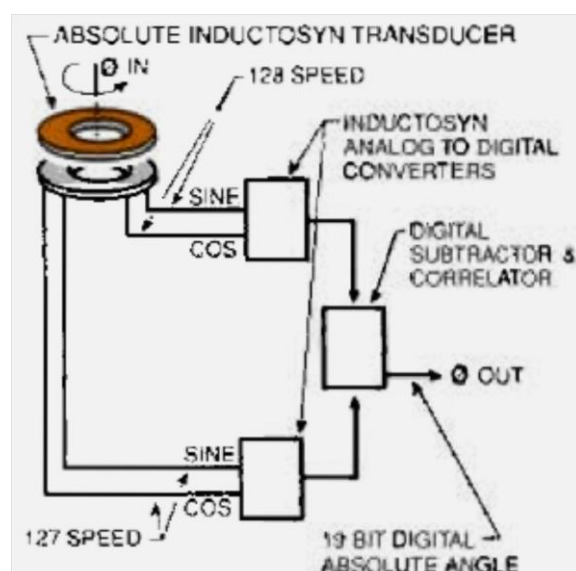
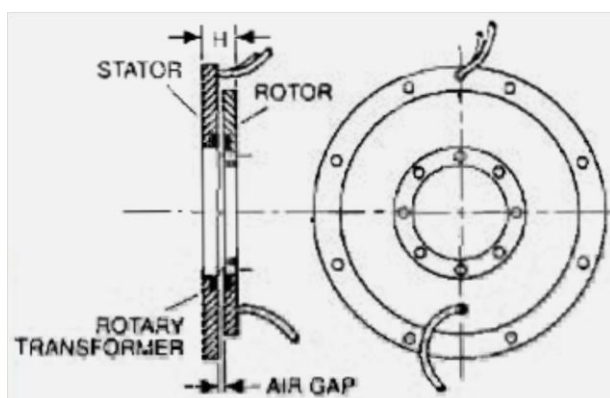


Рисунок 66 – Эскиз датчика Inductosyn® и схема системы обработки сигналов

Такие датчики выгодно отличаются от магнитных по двум параметрам: по помехоустойчивости и по геометрической конфигурации – они представляют собой два параллельных тонких кольца, которые крепятся к вращающимся частям мехатронного модуля поворота (рисунок 66).

Близкие по своим характеристикам двухотсчетные датчики угла поворота ИПУ-ДУЦ типа «вращающийся трансформатор» (ВТ) выпускаются оте-

чественной фирмой ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор» (рисунок 67) имеют точность 10 угл. секунд при массе 0,7 кг [41].

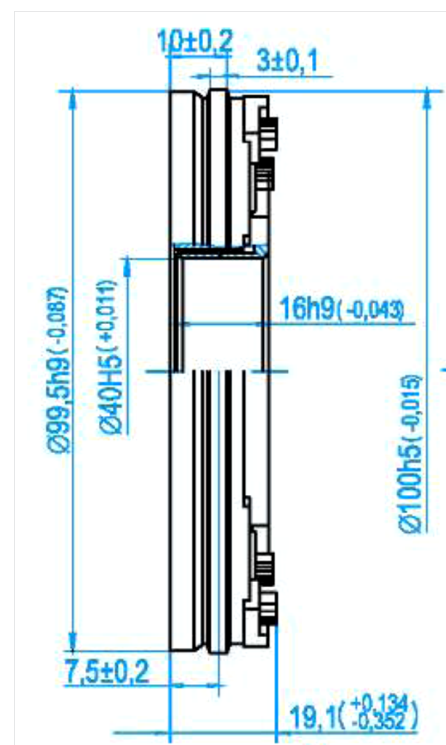


Рисунок 67 – Датчик типа ИПУ-ДУЦ и его габаритный чертеж

Эти датчики абсолютного угла поворота имеют два блока – датчик грубого отсчета и датчик точного отсчета. Гарантированная точность соблюдается при комнатной температуре.

Индуктивные датчики ОАО «ВНИТИ ЭМ» [42] основаны также на принципе работы вращающегося трансформатора типа «редуктосин». Наиболее близко подходит по своим параметрам к ТЗ, как по габаритам, так и по точности, датчик БВТВ100-С28 с размерами $\varnothing 100 \times \varnothing 50 \times 20$ мм (рисунок 68), он имеет погрешность ± 15 угловых секунд, что близко к требованиям ТЗ. Аналогичные характеристики имеет двухотсчетный датчик БВТА100-С30 (рисунок 69), позволяющий получать информацию об абсолютном угловом положении ротора после отключения питания.



Рисунок 68 – Одноотсчетный ДУП типа «редуктосин»



Рисунок 69 – Двухотсчетный ДУП **БВТА100-С30** типа «редуктосин»
 $\varnothing 100 \times \varnothing 50 \times 40$ мм

Преимущества таких датчиков в том, что обмотки находятся только на статоре и имеют свои подшипники повышенной точности. Утверждается, что они обладают повышенной стойкостью к воздействию климатических и механических факторов. Однако точных данных нет.

ЗАО «МЕРА» (Санкт-Петербург), основанное сотрудниками ВНИИМ им. М.И. Менделеева [43], разработало и запатентовало (патент РФ № 2419067) фотоэлектрический абсолютный датчик угла М071, который реализует абсолютный принцип измерения угла в круговом диапазоне с погрешностью 0,3 угл. сек.

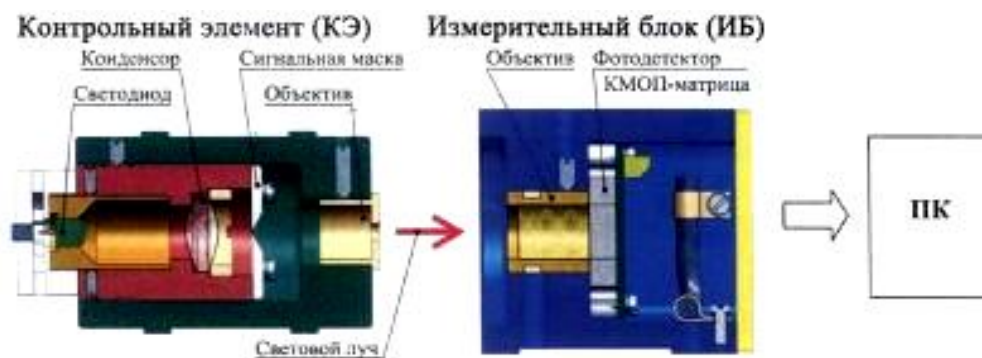


Рисунок 70 – Принцип действия фотоэлектрического датчика угла поворота М071

Фотоэлектрический датчик имеет два блока: контрольный элемент (КЭ) и измерительный блок (ИБ) (рисунок 70) [44]. КЭ содержит осветитель (светодиод, конденсор) и сигнальную маску с фотообъективом, устанавливаемую в фокальной плоскости объектива. ИБ содержит приемный объектив и многоэлементный фотодетектор (КМОП-матрицу со штатной электронной платой), устанавливаемый в фокальной плоскости объектива. Выходной сигнал с фотодетектора по высокоскоростному usb 2.0 порту поступает на ПК, который формирует выходной цифровой код измеряемого угла и преобразует его в величину разворота КЭ относительно ИБ датчика.

По сравнению с отечественными и зарубежными аналогами он имеет лучшую точность при меньших габаритах и массе: $\varnothing 50 \times 50$ мм, 0,5 кг. Применение датчика М 071 дает следующие эффекты по сравнению с аналогами:

- повышение точностных и эксплуатационных характеристик;
- уменьшение габаритов и масс преобразователей;
- уменьшение стоимости приборов.

Эти эффекты достигаются тем, что, во-первых, в преобразователях применен новый для этого типа приборов фотодетектор - многоэлементные устройства, ПЗС-матрицы, на которых возможно измерение линейных перемещений 0,01 мкм и выше, что, соответственно, приводит к снижению габаритов примерно в 10 раз по сравнению с прототипом. Кроме того, стоимость серийных образцов ПЗС-матриц составляет 100÷250 \$, что и определяет низ-

кую стоимость самого прибора. Во-вторых, оптические схемы (как на про-свет, так и на отражение) и контрольные элементы, устанавливаемые на измеряемом объекте, очень просты и дешевы, что также приводит к снижению стоимости преобразователя. В-третьих, оптическая связь между прибором и объектом измерения (вместо механической связи в приборе-прототипе) приводит к тому, что конструкция преобразователя вообще не содержит подвижных элементов, а расстояние между прибором и объектом может принимать различные значения. Это приводит, в свою очередь, к увеличению реальной точности измерений и расширению функциональных возможностей преобразователя. В-четвертых, в схеме прибора используется контроллер (ПК), осуществляющий программное обеспечение работы преобразователя и хранящий в памяти результаты метрологической калибровки, что также приводит к повышению точности измерений.

Хотя датчик не имеет центрального отверстия для прокладки кабелей, однако, малые размеры могут способствовать установке его в УП таким образом, что кабели будут располагаться сбоку от него.

Российская фирма СКБ ИС выпускает абсолютный угловой фотоэлектрический датчик положения ЛИР-ДА190 [45].



Рисунок 71 – Угловой фотоэлектрический датчик положения ЛИР-ДА190

Параметры: диаметр корпуса 90 мм, вал диаметром 10 мм, масса 0,7 кг разрешающая способность - до 24 разрядов на оборот, точность ± 5 угл. сек., способ выдачи данных - последовательный SSI, напряжение питания - +5 В (рисунок 71). Для нашего случая датчик имеет слишком большие габариты и не имеет центрального отверстия для кабелей.

В последнее время появились дешевые (6\$) абсолютные 14-разрядные (16384 точек/оборот) ДУП AS5048A/B [46] фирмы Austriamicrosystems, содержащие магнитные энкодеры с размерами 10x10x10 мм, основанными на эффекте Холла [47]. Принцип действия датчика состоит в том, что на торец вала крепится магнит, который вращается над магниточувствительной микросхемой, поэтому изменение магнитного поля при вращении позволяет точно определять положение вала (рисунок 72). Они стабильно работают в диапазоне температур от -55 до +150 °C. На сайте фирмы Austriamicrosystems показаны области применения датчиков в робототехнике (рисунок 73).

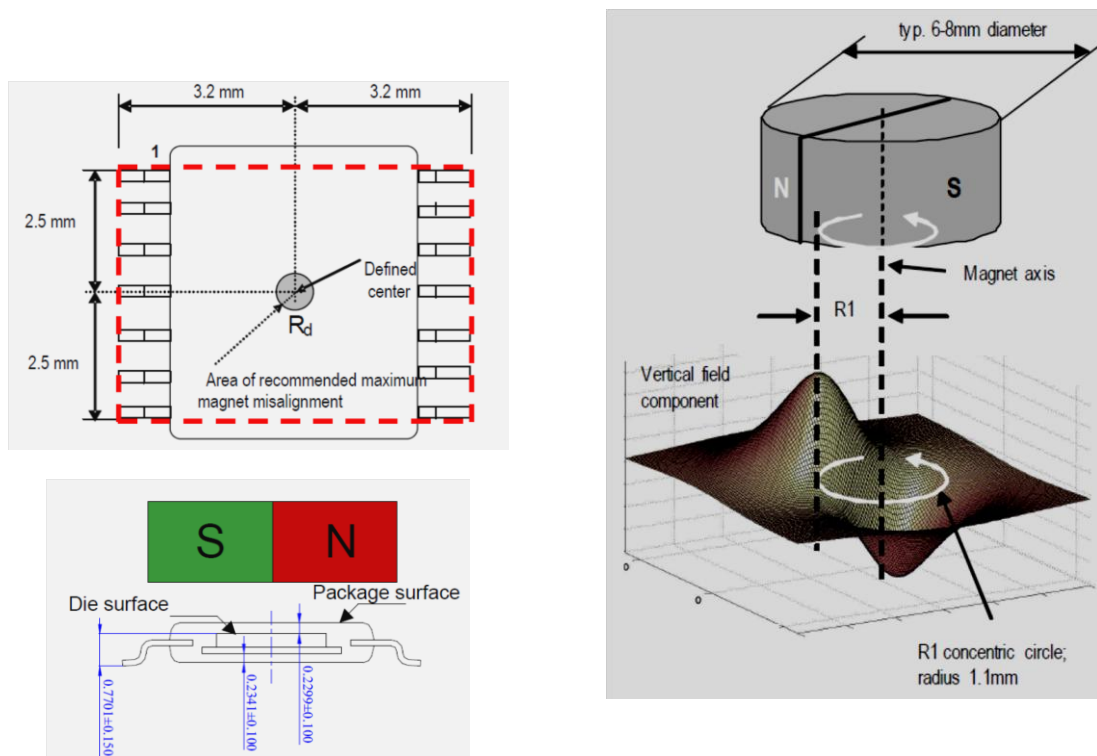


Рисунок 72 – Габариты магнитного энкодера и его принцип действия



Рисунок 73 – Возможности применения магнитных датчиков -энкодеров в робототехнике

Такой магнитный ДУП имеет малые размеры, поэтому он может быть легко встроен в стакан гибкого зубчатого колеса волновой передачи. Однако внушает опасения надежность работы магниточувствительной микросхемы под действием радиации.

Емкостные ДУП также производятся только зарубежными фирмами, например, немецкая компания Messtechnik Schaffhausen (рисунок 74) [48].

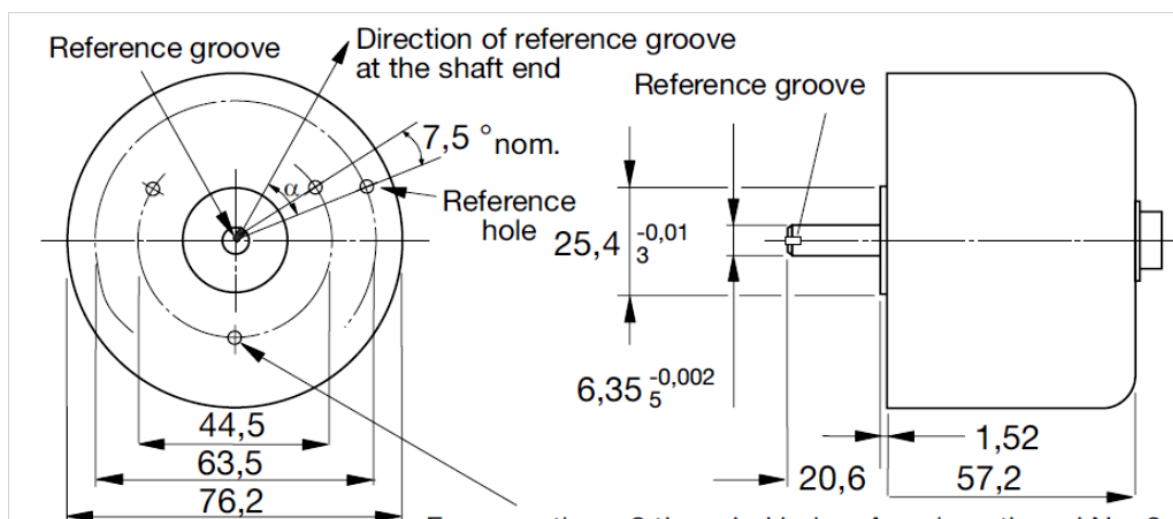


Рисунок 74 – Емкостной прецизионный ДУП

Они работают в большом диапазоне температур: $-55^{\circ}\dots+125^{\circ}$ С с погрешностью менее $0,01^{\circ}$. Имеет большие габариты и не имеет центрального отверстия для прокладки кабелей.

5.3 Механические передачи

Волновые редукторы, выпускаемые компанией Harmonic Drive (Германия), занимают одно из первых мест на рынке высокопроизводительных решений для систем электропривода с высокими требованиями к параметрам [49]. Отсутствие люфта, высокая точность передачи движения, компактность, наличие полого вала и высокая надёжность позволяют применять волновые редукторы Harmonic Drive в самых разных областях техники. Среди типичных областей применения можно назвать привода высокоточных станков и обрабатывающих центров, промышленные и андроидные роботы, технологическое оборудование для различных отраслей промышленности, телекоммуникационное и оптическое оборудование, авиационную и космическую промышленность.

Стандартные волновые редукторы Harmonic Drive представлены двумя большими группами, различающимися по конструкции. Установочные комплекты (Component Sets) отличаются тем, что поставляются не в виде готового полностью собранного изделия, а в виде комплекта деталей волновой передачи, сборка которых в единое целое производится непосредственно в изделии заказчика. Такое решение позволяет оптимальным образом вписать волновой редуктор в изделие, обеспечивая минимальные габариты конструкции. Установочные комплекты выпускаются в нескольких сериях, которые несколько отличаются по конструкции и по ряду параметров. Основной, базовой серией является установочный комплект HFUC (рисунок 75). Он выпускается в широком диапазоне габаритов: начиная с габарита 8 (диаметр ок. 30 мм) до габарита 100 (диаметр ок. 330 мм) с передаточными отношениями от 30 до 160.



HFUC-2A



CPL-2A



CSG-2A



CSD-2A



HFUS-2A



PMG

Рисунок 75 – Установочные комплекты волновых редукторов Harmonic Drive

Допустимые выходные моменты, развиваемые редукторами HFUC в продолжительном режиме работы, составляют от 1,4 Нм (для габарита 8) до 5720 Нм (для габарита 100). В повторно-кратковременном режиме момент на выходе редукторов может достигать 9180 Нм (для габарита 100). Комплекты CPL имеют минимальную массу изделия при сохранении производительности. Масса комплекта меньше на 50 %, а момент инерции на 40 % по сравнению с исходной серией HFUC. Комплекты CSD имеет осевую длину, уменьшенную примерно на 50 % по сравнению с базовой серией HFUC. При этом допустимые моменты ниже на 40 % и жёсткость по крутящему моменту ниже на 10-20 %. Серия PMG отличается тем, что выполнена в корпусе с подшипниковыми узлами, и выпускается в четырёх габаритах от 5 (диаметр 20 мм) до 14 (диаметр 50 мм) с редукциями от 50 до 110. Длительно допустимые моменты для этой серии редукторов составляют до 11 Нм. Выбор

комплекта в зависимости от задач может быть определен при помощи данных в таблице 7.

Таблица 7 – Предпочтительный выбор комплекта волнового редуктора [49]

Einbausätze Component Sets	Hohe Torsions- steifigkeit High torsional stiffness	Drehmoment/ Gewicht Torque/weight	Hohe Spitzen- drehmomente High peak torque capacity	Großer Hohlwellen- durchmesser Large hollow shaft	Geringe Baulänge Short axial length	Schnelle Verfügbarkeit Short delivery time
HFUG-2A	■ ■ ■	■	■ ■	■	■ ■	■ ■ ■
CPL-2A	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■	■ ■	■ ■	■ ■ ■
CSG-2A	■ ■ ■	■ ■	■ ■ ■	■	■ ■	■
CSD-2A	■ ■	■ ■	■	■ ■	■ ■ ■	■
HFUS-2A	■ ■ ■	■	■ ■	■ ■ ■	■ ■	■ ■ ■

■ ■ ■ **Sehr gut**
 very good
 ■ ■
■ **gut**
 good

Широкий ассортимент волновых редукторов Harmonic Drive позволяет предложить решение для самых различных задач, требующих точных компактных и высокопроизводительных решений. Благодаря большому опыту работы компания Harmonic Drive обладает широкими возможностями гибкой адаптации приводов в самых сложных условиях, что является залогом надёжной работы выбранного решения [50].

Заслуживают внимания циклоидные (цевочные) безлюфтовые редукторы Fine Cyclo® японской компании Sumitomo Drive Technologies [51]. Все редукторы серии Fine Cyclo не имеют механического люфта (зазора), поскольку собираются преднапряженными. Имеется несколько исполнений редукторов серии Fine Cyclo, каждое из которых предназначено для особых применений. Тип FA: FC-A – редукционный узел без подшипников. Другой тип FC F2C-C и F2CF-C – безлюфтовый редуктор с полым валом (в данном случае – центральным сквозным отверстием показан на рисунке 76), на-

пример, для проведения кабеля (параметры приведены в таблице 8). Редуктор надежно «защищен» уплотнениями.

Таблица 8 – Технические характеристики редукторов серии Fine Cyclo

Крутящий момент	до 3139 Нм (номинальный), до 6278 Нм (максимальный крутящий момент при ускорении)
Передаточные отношения	59:1, 89:1, 119:1
Диаметр центрального отверстия	от 49 до 99 мм



Рисунок 76 – Циклоидные редукторы Fine Cyclo

Преимущества циклоидных передач:

- отсутствие механического люфта;
- высокая торсионная жесткость;
- низкий момент инерции;
- малые потери на гистерезис;
- высокая устойчивость к ударным перегрузкам;
- компактность и удобный монтаж;
- консистентная смазка заправляется на весь срок службы.

По сравнению с волновыми редукторами циклоидные (цевочные) редукторы имеют большие вес и габариты.

6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАНИПУЛЯТОРОВ

6.1 Общие вопросы проектирования

Как промышленные, так и сервисные роботы образованы из манипулятора, системы управления и устройства перемещения. Последнее в стационарных роботах отсутствует. Данный раздел посвящен проектированию именно манипуляторов.

В зависимости от решаемых задач и условий применения манипуляторы имеют различную структуру. Наиболее совершенные манипуляторы в пределах содержат следующие функциональные элементы:

- двигатель;
- стояночный тормоз;
- передачи и редукторы;
- устройства уравнивания;
- опора вращения выходного звена (ОВВЗ);
- датчики угла абсолютный и относительный;
- датчик момента;
- датчик температуры;
- электрические коммуникации, провода, соединители, контактные кольца;
- средства защиты от неблагоприятных условий работы, грязи, жидкости, температуры, радиации и тому подобные;
- статические конструкции, корпуса, механические неподвижные соединения, метизы;
- рабочие органы, в том числе, захватные устройства;

- устройства управляемого соединения/разъединения, в том числе, автоматической смены рабочих органов;
- средства энергетического обеспечения, в том числе, аккумуляторы и устройства их подзарядки;
- электронные блоки информационно-управляющей системы;
- средства технического зрения, телевизионные камеры и осветители.

Последние три элемента относятся к информационно-управляющей системе. Но в конструкции манипулятора им должно быть предусмотрены место, крепление, защита и удобство их обслуживания. Датчики угла, момента и температуры входят как в информационно-управляющую систему, так и в исполнительный механизм манипулятора. В более простых манипуляторах часть функциональных элементов отсутствует.

На ранних, предпроектных этапах создания новой техники формируются технические требования и проектный облик манипулятора.

Определяется сфера применения робота – промышленность или сервисное обслуживание. Промышленные роботы обычно стационарны, при сходных размерах рабочей зоны отличаются относительно высокой точностью и жесткостью и, соответственно, большой массой. В настоящее время промышленность России оснащается импортными роботами.

Лидирующие позиции в роботостроении занимают следующие фирмы:

- Fanuc (Япония),
- KUKA (Германия),
- ABB (Швеция, Швейцария),
- Kawasaki (Япония),
- Motoman (Япония, США),
- OTC Daihen (Япония),
- Panasonic (Япония),
- Universal Robots (Дания),

- Rethink Robotics (США),
- iRobot (США).

Эти фирмы производят роботы в больших объемах, ведут активную научно-исследовательскую и опытно конструкторскую работу, предлагают множество различных моделей (например, Motoman выпускает 172 различные модели). Активны также следующие роботостроительные фирмы: Comau, Nachi, Adept, Cloos, Denso, Epson, Fuji Ace, Hyundai, IGM, Staubli, Toshiba, NOKIA / PUMA, Schunk и другие. Более подробную информацию о текущем состоянии производства и использования роботов в мире можно найти, например, на сайте «robotforum.ru».

В России промышленные роботы производятся преимущественно по специальным заказам из импортных комплектующих. В области поставки, ввода в эксплуатацию и разработки промышленных роботов наиболее заметны следующие отечественные фирмы: ARKODIM, АвангардПЛАСТ, БИТ Роботикс, Рекорд-Инжиниринг, Eidos Robotics, Волжский машиностроительный завод и другие.

Большинство серийных промышленных роботов стоят порядка 10...40 тыс.дол. Стоимость роботов с особыми свойствами, например, со специальным технологическим оснащением или повышенными точностями и грузоподъемностью, могут стоить несколько сотен тысяч долларов США.

Из-за особенности развития российской экономики, а также сложности конкуренции, отечественные научные и производственные предприятия основное свое внимание уделяют созданию сервисных роботов для экстремальных условий работы, и прежде всего, специального назначения. Импорт таких роботов или ограничен различными запретами, или нежелателен с точки зрения технической политики и безопасности нашего государства.

Большинство сервисных роботов являются мобильными и снабжены техническим зрением. Дополнительно они оснащаются либо манипуляторами, либо устройствами специального назначения. Роботы для экстремальных

условий работы обычно управляются человеком-оператором дистанционно с элементами автоматического программного управления отдельными стандартными операциями.

Разработка манипуляторов происходит в несколько этапов. Вначале принимаются общие решения – это предпроектный этап. Затем следует компоновка общая манипулятора и отдельных его узлов. Проектируются отдельные функциональные элементы. И наконец разрабатывается рабочая конструкторская и технологическая документация.

На первом этапе уточняется общая цель проекта в широком смысле. Например, ставится задача по повышению конкурентоспособности за счет удешевления или совершенствования.

Уточняются особые свойства проектируемого робота. В том числе способность работать в экстремальных средах: радиации, вакуума, невесомости, под водой и тому подобное. Для производства особо ответственных приборов или медицинских препаратов роботам придется обладать способностью стерилизации и отсутствия загрязняющих выбросов продуктов износа. Некоторые специальные роботы должны быть скрытными, бесшумными, с низким электромагнитным излучением.

В особо сложных случаях применяются необычные схемные решения робототехнической системы. Например, роботы выполняются подобными человеку или иному биологическому организму. Таким образом им придается возможность работы в среде, приспособленной к человеку, или способность передвигаться по узким извилистым каналам.

К общим концептуальным решениям проектируемого робота относится выбор вида элементной базы. В принципе возможна сборка робота из готовых купленных манипулятора и системы управления. Оригинальными выполняются только специфичные элементы робота, например, рабочие органы. Другая крайность – покупаются только мелкие второстепенные детали. А все остальное разрабатывается и изготавливается самостоятельно или по

кооперации на основе специальных технических требований. Возможны промежуточные степени завершенности покупных функциональных элементов: модули устройств вращения, сервоприводы, мотор-редукторы, серводвигатели и тому подобное.

Соотношение специальных собственного производства и покупных унифицированных элементов должно быть оптимальным по выбранному критерию. Манипуляторы, построенные из функционально полных мехатронных модулей поворота звеньев, часто оказываются неоправданно громоздкими и тяжелыми. Это вызвано неизбежной избыточностью конструкций модулей, связанной с многоцелевым их назначением. Представляется более рациональным унифицировать только такие элементы, как шпиндели, редукторы, двигатели, датчики и некоторые вспомогательные детали. А все несущие корпуса звеньев предлагается делать специальными, с минимумом разъемов, наилучшим образом соответствующими специфике места расположения устройства поворота в кинематической цепи манипулятора.

Следующий шаг – создание специальных встраиваемых исполнений функциональных элементов. Например, пускать шарики или ролики подшипников непосредственно по неподвижному и подвижному корпусам шпинделя (без самостоятельных колец подшипника). Это возможно, так как габариты подшипники в устройства поворота обычно выбираются не по нагрузке, а из компоновочных соображений. Кроме того, за весь срок эксплуатации в сервисном манипуляторе количество оборотов выходного звена устройства поворота оказывается сопоставимым с количеством оборотов, совершаемых обычными производственными механизмами за несколько минут. Дорожки качения корпусов из алюминиевых сплавов могут быть упрочнены соответствующим покрытием с последующим шлифованием.

Покупные компоненты выпускаются фирмами, специализирующимися на серийном их производстве. Специальные компоненты оригинальны для данного робота. Их разработка и производство либо заказывается специали-

зированным фирмам, либо выполняется самостоятельно в организации, занимающейся созданием манипулятора. Унифицированные компоненты, как правило, дешевле специальных, но из-за неизбежной избыточности функциональности оказываются более громоздкими и тяжелыми. Конструкция устройств поворота на базе покупных компонентов относительно консервативна. А разработка устройств поворота со значительной долей специальных функциональных элементов, в том числе интегрированных, является более радикальным, новаторским и, соответственно, рискованным и трудоемким.

Эти общие решения принимаются в процессе анализа конкурентоспособности, экономической эффективности проекта или общей технической политики. На основе предпроектного этапа формируется предварительный технический облик робота, включающий структуру и основные эксплуатационные свойства.

6.2 Компоновка манипулятора

Под компоновкой (от лат. *componere* – складывать, строить, сочинять) робота понимается разделение на части, связи и взаимное положение его отдельных элементов.

Как и проектирование в целом, компоновка манипулятора разрабатывается итеративно посредством постепенного улучшения и уточнения решений, принятых на предшествующих этапах. Общая компоновка манипулятора уже просматривается в предварительном исходном техническом облике. В основе формирования предварительного технического облика лежит анализ известных реализованных или ранее предложенных образцов роботов. Из них выбирается прототип. Выявляются недостатки прототипа, мешающие его прямому использованию в соответствии с поставленной целью проекта. Предварительный технический облик получается в результате модернизации прототипа по устранению этих недостатков.

Основными компоновочными характеристиками манипуляторов являются состав, вид и взаимное положение устройств реализации степеней подвижности. В обобщенном виде они описываются, так называемой, системой координат робота. Подавляющее большинство современных роботов и манипуляторов строятся на основе только вращательных степеней подвижности. То есть они работают в сложной ангулярной системе координат. В данном пособии рассматриваются только такие схемы. Роботы с поступательными степенями подвижности несколько точнее, но существенно более громоздки и тяжелы. Они применяются преимущественно в относительно редких случаях, когда требуются особо большие перемещения порядка 3...9 метров и более. Таким образом перемещаются манипуляторы относительно обслуживаемого оборудования по полу (рисунок 77) или portalу (рисунок 78).



Рисунок 77 – Перемещающийся по полу робот KL 250-3 (фирмы Кука) [55]



Рисунок 78 – Портальный робот KUKA модель KR 60 JET [56]

Несколько десятилетий в качестве перспективных рассматриваются манипуляторы параллельной параллельными кинематическими цепями, например платформы Стюарта или близкие к ним. Однако в силу специфических особенностей, связанных с нелинейностью характеристик, пониженной демпфирующей способностью и сложностью управления практическое применение получили только манипуляторы узко специализированные (рисунок 79).



Рисунок 79 – Манипулятор с параллельной структурой производства фирмы Fanuc модели F-200iB [56]

Здесь верхняя платформа перемещается по 6 степеням подвижности раздвигающимися стойками с электроприводом и шарико-винтовыми передачами.

Схема размещения приводов на манипуляторе является одним из ключевых решений в робототехнике. Наиболее простой и очевидной является расположение двигателя и редуктора в шарнирах, или точнее, на звеньях, смежных с приводимым шарниром. По компоновку приводов имеют все ро-

боты, построенные из функционально завершенных модулей шарниров (устройств поворота), – рисунки 80. и 81.



Рисунок 80 – Модульный робот фирмы Universal Robots модели UR3 [56]



Рисунок 81 – Модульный робот фирмы Schunk модели LWA 4D [56]

Подобные роботы из унифицированных модулей представляются весьма перспективными благодаря повышению серийности их производства, и следовательно, удешевлению и совершенствованию конструкции и техноло-

гий. Однако из общего количества различных моделей серийных роботов модульные конструкции составляют всего несколько процентов. Это связано с избыточными габаритами и массами, вызванными дискретностью параметрических рядов и дополнительными конструкциями соединения модулей в различных конфигурациях. Такие роботы применяются в случае относительно небольших нагрузок и точностей. Например, фирма Universal Robots известна своими успехами в области коллаборативных роботов, у которых развитая система измерения сил и моментов, в значительной мере, позволяет компенсировать погрешности от деформаций манипулятора.

Компоновки с приводами в шарнирах распространены в большинстве сервисных роботов, в том числе, манипуляторов космического назначения (рисунки 82 и 83) и специальных мобильных (рисунок 84)





Рисунок 82 – Канадские космический роботы Canadarm [57]



Рисунок 83 – Российский робот для обслуживания МКС разработки ЦНИИ РТК [58]



Рисунок 84 – Российский мобильный робот «Капитан» разработки ЦНИИ РТК [59]



Рисунок 85– Промышленный робот Motoman HC10DT [60]

В относительно небольших ПР с малой грузоподъемностью также иногда все приводы размещают в шарнирах (рисунок 85). Однако в таких промышленных роботах унифицируются только основные функциональные элементы встроенных в шарниры приводов, в том числе редукторы, двигатели и датчики положения. А корпуса, в которых монтируются элементы приводов шарниров, смежных в кинематической цепи, выпускаются специальными цельными. Это объясняется соображениями минимизации массы манипулятора за счет устранения лишних соединений корпусов. Массы соединений оказываются сопоставимыми или превышающими массы основных элементов приводов – редукторов и двигателей.

Приводы составляют значительную часть массы и габаритов робота. Приводы вблизи рабочего органа ограничивают возможности манипулирования в стесненной рабочей зоне. А их масса, вынесенная на периферию и движущаяся с большой скоростью, может составлять существенную часть приведенного момента инерции многокоординатного устройства. Велика опасность их отказа под действием радиации или химически агрессивных сред. Для преодоления данных негативных эффектов приводы стремятся удалить от шарниров вплоть до размещения на неподвижном основании. В пределе все приводы размещаются в едином неподвижном блоке. К шарнирам движение передается через цепь передач, проходящим по звенья и сквозь предшествующие шарниры (рисунок 86).

Подобными манипуляторами оснащаются производства радиоактивных, химически или взрывоопасных объектов (рисунок 87). Исполнительный манипулятор чисто механического вида находится в так называемой горячей, то есть, опасной зоне. А задающие манипуляторы и все приводы размещаются в холодной зоне, защищенной от агрессивных воздействий.



Рисунок 86– Копирующий манипулятор для работы с радиоактивными объектами, разработанный в СССР для нужд атомной промышленности [61]

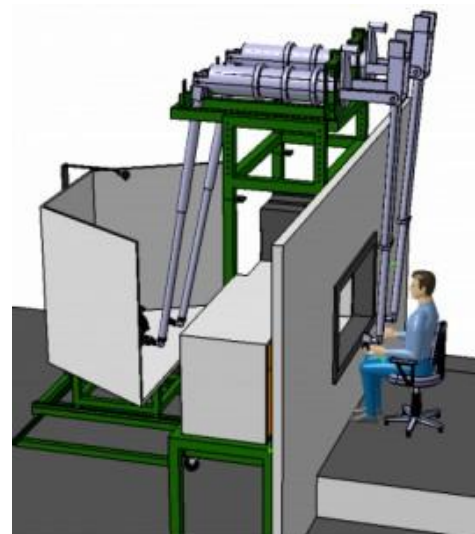
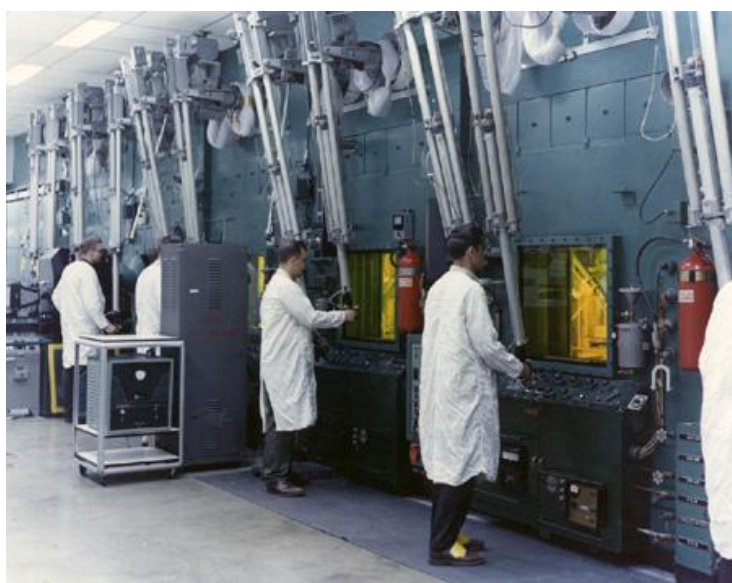


Рисунок 87 – Применение манипуляторов с дистанционным копирующим управлением для работ с радиоактивными и другими опасными объектами, Уральский завод газоочистительной аппаратуры [62]

Дополнительные передачи несколько усложняют устройство. А их масса частично ослабляет эффект уменьшения инерционности за счет переноса приводов на неподвижное основание. Поэтому подобная компоновка оправ-

дана в том случае, если приводы составляют существенную часть массы и габаритов манипулятора в целом.

В большинстве промышленных роботов применяется комбинированная компромиссная компоновка приводов на манипуляторе. Приводы степеней подвижности, близких к основанию, размещаются в шарнирах. Наиболее критична масса и габариты конструкций вблизи рабочего органа. Поэтому двигатели приводов переориентации обычно удаляются либо в середину локтевого звена (рисунок 88), либо чаще за локтевой шарнир (рисунок 89).



Рисунок 88– Робот фирмы KUKA модели KR 10 R1100 sixx WP [63]

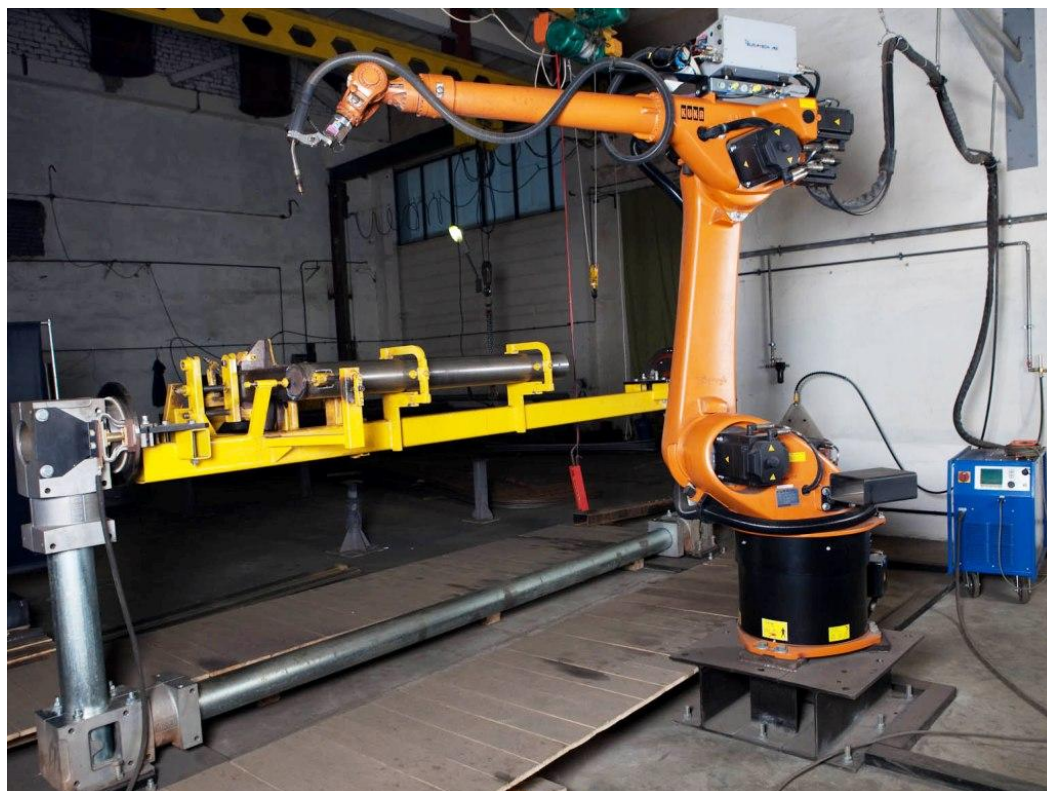


Рисунок 89 – Сварочный робот фирмы Кука с двигателями кисти на дальнем конце локтевого звена манипулятора [64]

Движение от этих двигателей подводится к дифференциальному двух-степенному механизму кисти либо полыми валами (соосными или качающимися с шарнирами Гука), либо зубчатоременными передачами (рисунок 90).

Выходные звенья механизмов переориентации рабочего органа непосредственно связаны с выходной ступенью волнового или планетарного редуктора с цевочным зацеплением. На вход редуктора наклона рабочего органа вращение подается от выше упомянутых передач непосредственно. А на вход редуктора ротации – через дифференциальный зубчатый механизм.

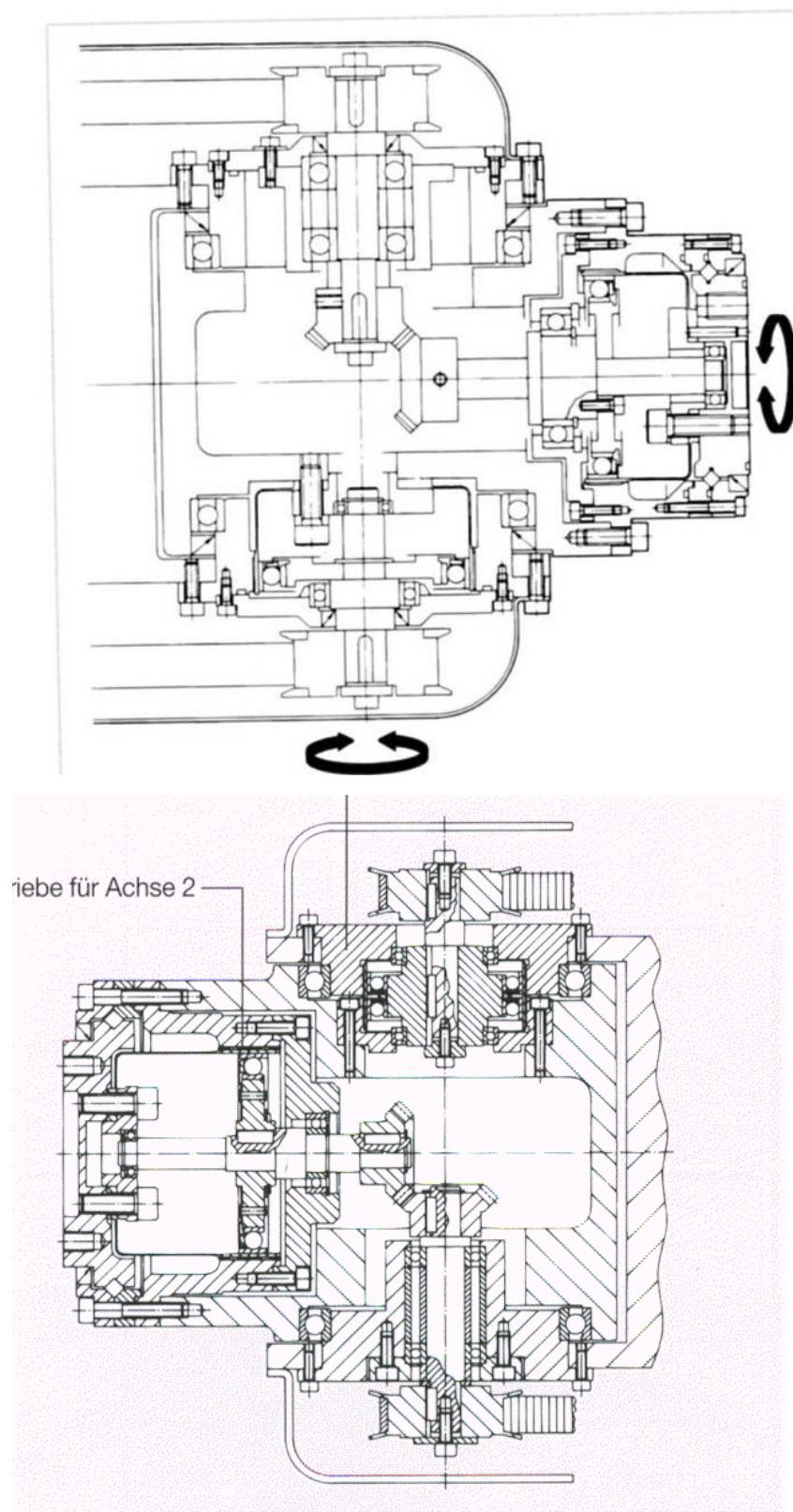


Рисунок 90 – Схемы компоновки кисти промышленного робота

Иногда движение от двигателей на дальнем хвосте локтевого звена по-
даются к редукторам кисти через три соосных вала и соосные конические пе-
редачи (рисунок 91).



Рисунок 91 – Робот фирмы Comau (Италия) модели Smart5 NJ4, Италия [56]

В тяжелых ПР иногда привод, включая двигатель и редуктор, локтевого шарнира переносится на ось плечевого шарнира (рисунок 92). С локтевым звеном он связывается параллелограммным механизмом. Параллелограммные механизмы ограничивают угол поворота менее 180° . Ранее они применялись более широко. В настоящее время подобная компоновочная схема оказывается несколько консервативной и находит применение преимущественно в тяжелых ПР.



Рисунок – 92 Промышленный робот фирмы Fanuc модели M-900iA 350 [56]

Параллелограммные механизмы являются основой отдельного класса ПР – роботов для паллетирования (рисунок 93). При выполнении погрузочно-транспортных операций паллеты всегда остаются горизонтальными. Для упрощения и удешевления таких вспомогательных роботов горизонтальная ориентация объекта манипулирования стабилизируется (сохраняется неизменной) двумя параллелограммными механизмами, Правый шарнир нижнего параллелограмма установлен на выходном звене поворота манипулятора. Поэтому при повороте плечевого звена промежуточный корпус на верху манипулятора не меняет своей ориентации относительно горизонта. А при наклоне локтевого звена верхний параллелограмм сохраняет неизменную ориентацию кисти относительно этого промежуточного корпуса.



Рисунок 93 – Робот для паллетирования фирмы Kuka [65]

Такие ПР имеют всего 4 степени подвижности, шарниры: вращения относительно основания, качания плечевого звена, качания локтевого звена и вращения рабочего органа относительно вертикальной оси кисти. В обычном роботе на привод плечевого шарнира действует сумма моментов от плечевого и локтевого звеньев. То есть привод плечевого шарнира примерно в два раза больше локтевого. А в данном роботе момент от локтевого звена воспринимается параллелограммом и не ложится на привод плечевого звена. В результате приводы основных плечевого и локтевых шарниров примерно одинаковы по нагрузочной способности. Компоновочная схема (рисунок 6.17) весьма распространена и используется большинством роботостроительных фирм. Иногда идут дальше и дополнительно к двум параллелограммам стабилизации ориентации кисти вводится третий параллелограмм передачи на локтевое звено движущего момента от привода, соосного плечевому шарниру (рисунок 94).



Рисунок 94 – Робот для паллетирования фирмы Kuka [66]

К общим для манипулятора компоновочным решениям относится концепция размещения и взаимосвязей электронных компонент на манипуляторе. Централизованная схема управления всеми устройствами от одного блока на неподвижном основании приемлема только для очень простых роботов. В более сложных роботах такой подход приводит к чрезмерному количеству (более сотни) проводов, проходящих по звеньям и через шарниры манипулятора. Масса этих проводов может оказаться сопоставимой с массой всех остальных механизмов и конструкций манипулятора. Поэтому стремятся делать информационно-управляющую подсистему распределенной. Для каж-

дой степени подвижности оформляется локальный электронный блок (или блоки, удобные для размещения) управления приводом и обработки сигналов датчиков обратной связи. Работа шарниров координируется центральным блоком через общую шину управления. Имеется также общая шина силового питания приводов и локальных блоков управления. Система технического зрения также обычно требует отдельных каналов питания и передачи информации. Таким образом по манипулятору проходит жгут, содержащий около десятка проводов различного назначения и конструкции (сечения, изоляции и экранизации).

Получили распространение три основных варианта реализации проводной электрической связи в работе:

- гибким жгутом по поверхности манипулятора;
- гибким жгутом через сквозные полости по центру шарниров;
- электрическими контактными кольцами в шарнирах, соединенными не изгибаемыми проводами, проложенными по корпусам звеньев манипулятора.

Гибкий жгут на поверхности манипулятора наиболее просто ремонтировать. Но он уязвим под действием случайных внешних механических воздействий.

Прокладка проводов внутри манипулятора более эстетична и защищена от внешних воздействий. Но для ее ремонта зачастую приходится разбирать весь манипулятор. Кроме того требуется специальное исполнение редукторов и двигателей с полям валом.

Электрические контактные кольца более сложны и могут оказаться источником дополнительных электрических помех. Но они решают проблему долговечности многократно деформируемых проводов.

6.3. Проектирование устройств поворота звеньев манипулятора

Проектирование устройств поворота включает следующие этапы:

- Компоновка устройства, концептуальные решения структуры, взаимосвязей и расположения функциональных элементов.
- Выбор функциональных элементов и уточнение их взаимного положения и связей.
- Проектирование опор вращения выходного звена, корпусов и соединений.

Компоновка устройств поворота

Структура устройств поворота определяется местом в манипуляторе и общими концептуальными решениями робота, принятыми на предшествующих этапах. С точки зрения компоновки шарниры могут быть подразделены на два вида: продольные и поперечные. Оси продольных шарниров лежат (или параллельны) в общей плоскости манипулятора. А оси поперечных – перпендикулярны этой плоскости. Например, в сварочном манипуляторе (рисунок 64) к продольным относятся шарниры, начиная от основания 1-й, 4-й и 6-й, а к поперечным 2-й, 3-й и 5-й.

В продольных шарнирах вход, ведущий к рабочему органу манипулятора, всегда лежит по одну сторону от обоих подшипников выходного звена. Нагрузка всегда прикладывается на вылете за пределами опор, поэтому схему узла будем называть консольной.

В поперечном шарнире рабочий орган манипулятора через цепь промежуточных конструкций может прикрепляться к выходному звену за пределами его подшипниковых опор. Его тоже можно отнести к консольному типу. Например, в том же сварочном роботе (рисунок 64) все шарниры, кроме 5-го, имеют консольную компоновку.

У поперечных шарниров возможна и альтернативная компоновка, назовем ее двухопорной или в виде вилки. Рабочий орган манипулятора через цепь промежуточных конструкций может прикрепляться к выходному звену шарнира между подшипниковых опор. Например, в роботе фирмы Kuka (рисунок 63) компоновку в виде вилки имеют шарниры 2-й, 3-й и 5-й. В компо-

новках типа вилки максимально большая база (расстояние) между опорными подшипниками при сходных габаритах узла. Более равномерно распределяется нагрузка между опорами. С вилки к поворачиваемому звену можно подходить с двух сторон, что упрощает решение проблем конкуренции подсоединения привода и абсолютного датчика угла, а также проведения проводов через шарнир. Создается впечатление, что компоновка в виде вилки предпочтительна в случае больших грузоподъемностей.

Однако ей присущи ряд недостатков. Несколько ограничивается диапазон допустимых углов поворота. Существенно сложнее изготовление и монтаж. В целом устройства поворота с компоновкой в виде вилки носят несколько консервативный характер. По мере развития робототехники они постепенно вытесняются консольными компоновками, в том числе на основе шариковых и роликовых погоньев или сдвоенных подшипников большого диаметра (радиальная база вместо осевой).

На первый взгляд задача проектирования устройства поворота в современных условиях представляется предельно простой. Достаточно рассчитать соответствующие техническим требованиям на манипулятор основные параметры проектируемого привода: момент, скорость и точность. Посредством интернета по этим параметрам можно подобрать подходящие покупные компоненты и соединить их последовательно в следующую цепь:

- датчик угла относительный;
- двигатель;
- редуктор;
- датчик момента;
- датчик угла абсолютный;
- «шпиндель» - тихоходная опора вращения выходного звена.

Каждый из этих компонентов, кроме датчика момента, содержит вал, установленный на опорах в неподвижном корпусе. Все валы соединяются

между собой безлюфтовыми компенсационными муфтами. А корпуса строго соосно устанавливаются в неподвижном корпусе.

При анализе этого простейшего предварительного компоновочного решения выясняются следующие трудно разрешимые проблемы.

Как выводить сигнал с находящихся на вращающемся валу тензометров датчика момента на электронные платы предварительного усиления и далее управления привода? Эту электронную плату можно разместить на выходном звене устройства поворота. Но тогда обязательно потребуется полый вал «шпинделя». В принципе возможна беспроводная передача сигнала и питания тензометров. Но такие системы сложны и ненадежны.

При одинаковых требованиях по моментам и точности известные компенсационные соединительные муфты по габаритам и массам оказываются близкими к редукторам. Например, почему диаметр зубчатой муфты может оказаться существенно меньше диаметра зубчатого колеса волнового или планетарного редуктора?

Каждый компонент имеет свой корпус с подшипниками. Они оказываются дополнительными (дублирующими) общему корпусу и «шпинделю» узла вращения.

В итоге компоновка из покупных функционально завершенных компонент в принципе возможна, но только для стационарных машин, например, станков или иного технологического оборудования. В робототехнике она неприемлема из-за чрезмерных габаритов и масс.

В устройствах поворота звеньев манипулятора получила распространение компоновочная схема с двумя валами на подшипниках. Быстроходный вал объединяет относительный датчик угла, двигатель и входное звено редуктора. Тихоходный вал, он же выходное звено устройства поворота, несет выходное звено редуктора, датчик момента и абсолютный датчик угла. Тихоходный вал установлен в корпусе устройства поворота на подшипниках его выходного звена. Для реализации такой схемы необходимо, чтобы все ком-

поненты были бескорпусными и были оформлены в виде двух колец: вращающегося ротора и неподвижного статора. Подобные ограничения существенно сужают множество приемлемых вариантов комплектации проектируемого шарнира.

Например, подобную компоновку имеют устройства поворота звеньев манипуляторов космического назначения (рисунок 67).

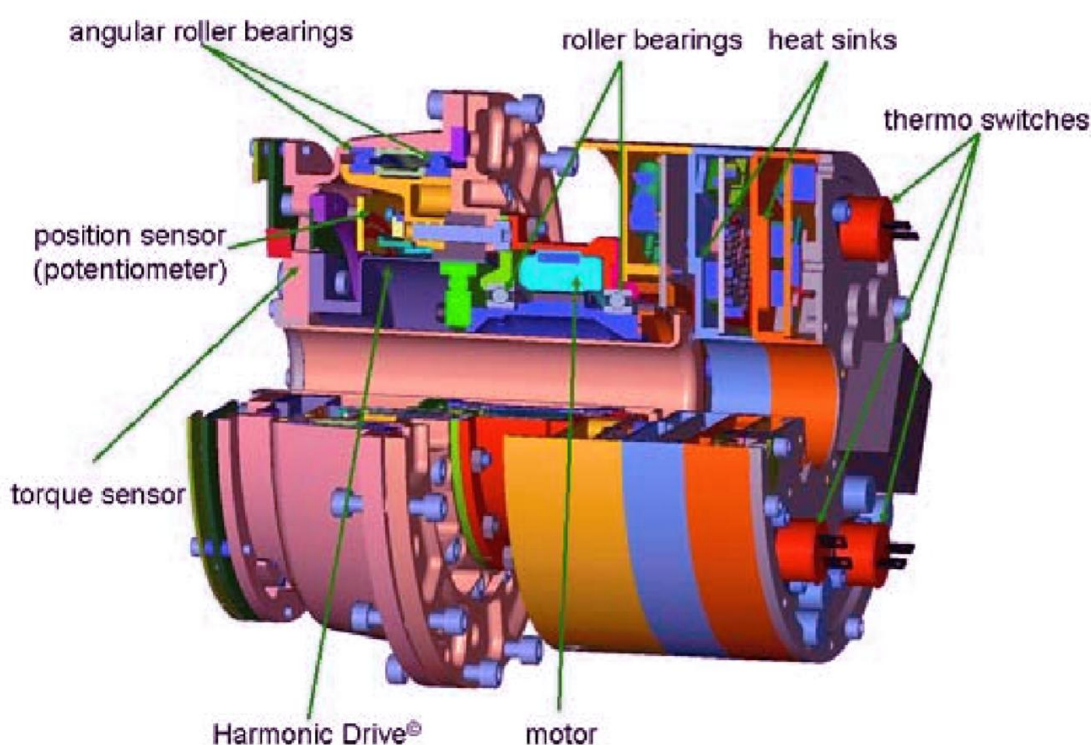


Рисунок 95 – Устройства поворота звеньев робота космического назначения фирмы ROKVISS (DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics) [67]

Выходное звено этого устройства оформлено в виде стакана с фланцем под крепление конструкций, ведущих к рабочему органу. Относительно неподвижного корпуса оно установлена на рядом стоящих шариковых подшипниках большого диаметра и малого поперечного сечения. То есть реализована схема радиального базирования «шпинделя». В переднем фланце (левом) организованы ослабленные радиальные балки, на которые наклеены тензодатчики измерения момента, развиваемого устройством. К центральной

части выходного фланца прикреплено гибкое колесо волнового редуктора. Генератор деформаций с гибким подшипником установлен на быстроходной втулке в собственных шариковых подшипниках. На этой втулке наклеены постоянные магниты синхронного бескорпусного электродвигателя. Между неподвижным основанием и входным звеном размещен абсолютный датчик угла, в данном примере потенциометрического типа. По центру устройства поворота имеется сквозное широкое отверстие для прохождения сквозь шарнир гибких проводов. Для защиты от механического повреждения этих проводов на выходном фланце закреплена тонкостенная втулка. В задней части (правой) размещены электронные блоки управления и стабилизации температуры. Обращаем внимание, насколько тонкие стенки корпусных деталей. Это характерно для устройств поворота звеньев роботов.

Сходную компоновочную схему имеют сервоприводы компании Harmonic Drive (рисунок 43) общетехнического назначения. В них отсутствует датчик момента и платы управления. Кроме того, конструкции существенно массивнее, чем требуется для робототехники. Модули комплектных сервоприводов или мотор-редукторы общетехнического применения по этим причинам обычно оказываются неприменимы в роботах.

Для серийного производства фирмы, специализирующиеся на производстве редукторов и электродвигатели, выпускают модификации, приспособленные для использования именно в роботах. Они отличаются усиленными подшипниковыми узлами и в целом облегченным конструктивным исполнением. Распространена практика взаимодействия компаний роботостроительных и фирм, производящих функциональные элементы, по разработке и производству мотор-редукторов оптимальных для конкретных образцов манипуляторов.

В мобильных роботах для экстремальных условий (рисунки 84 и 96) манипуляторы обычно относительно медленные и небольшие. Они управляются человеком-оператором дистанционно.



Рисунок 96 – Мобильный робот фирмы iRobot (США) модели iRobot 710 Kobra [68]

В их устройствах поворота часто используется следующая последовательность компонентов: планетарный серво мотор-редукторы с относительным инкрементальным датчиком угла, дополнительная выходная ступень передач, подшипники опоры выходного звена, абсолютный датчик угла, электрические контактные кольца. Большинство из этих элементов покупные унифицированные. Специальными, разрабатываемыми и изготавливаемыми роботостроителем компонентами выполняются выходная ступень передач в опорах выходного звена, а также разнообразные корпусные и соединительные детали. Также специальными могут быть встраиваемые электрические контактные кольца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время складывается впечатление, что можно легко купить необходимый робот в целом или по частям. На самом деле при решении многих задач требуются специальные роботы, отсутствующие на рынке. А при собственной сборке необходимо знать, какие части робота необходимо купить, насколько они совместимы и как их соединить.

В предлагаемой читателю книге приводится обширная информация о видах, устройстве и работе функциональных элементов манипуляторов промышленного и сервисного назначения. Рассматриваются проблемы концептуальных и, прежде всего, компоновочных решений роботов. Описаны особенности построения устройств поворота звеньев манипуляторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Жмылевская М.Л., Гришин. Б.В. Мобильные и подвижные роботы, используемые в немашиностроительных отраслях: - ВНИИ-ТЭМР, 1991 -280 с.
- 2 <http://www.minpromtorg.gov.ru/actions/foresight/17>
- 3 http://rus-robot.com/articles/vnedrenie_promyshlennyh_robotov_v_rossii_i_zarubezhem/
- 4 <https://aripix.com/>
- 5 <http://www.kommersant.ru/doc/2138753>
- 6 <http://2045.ru/news/30973.html>
- 7 <http://www.fanucrobotics.ru/ru>
- 8 <http://www.universal-robots.ru/RU/Produkte.aspx>
- 9 <http://www.fam-robotics.ru/>
- 10 www.ru.schunk.com
- 11 <http://www.mirprom.ru/public/primenenie-robotov-v-aerokosmicheskoy-promyshlennosti.html>
- 12 <http://www.ocrobotics.com/>
- 13 <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20110118000723&mod=skb>
- 14 <http://robonaut.jsc.nasa.gov/default.asp>
- 15 <http://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-5471/>
- 16 <http://npo-at.com/projects/space/>
- 17 <https://neuronus.com/news-tech/30-robot-android-sar-400.html>
- 18 <http://www.esa.int/esasearch?q=Eurobot+&r=>
- 19 <http://www.cobham.com/>
- 20 <http://www.ocrobotics.com/products--services/>
- 21 <http://hanool.en.ec21.com/>
- 22 <http://iwindoro.ru/>
- 23 <http://robin.dynsoft.ru/price.php>
- 24 <http://www.montech.com/index.php?nav=6,767,785>
- 25 <http://www.weiss-gmbh.de/Rotating-units-ST-SW.1180.0.html?&L=1>

- 26 <http://www.afag.com/en/products/handling-electrical/rotary-modules.html>
- 27 <http://www.schunk.com/>
- 28 www.ru.schunk.com
- 29 <http://www.harmonicdrive.de/english/products/servoproducts/servoactuators/cha/>
- 30 <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/content/products>
- 31 http://www.elektropribor.spb.ru/prod/rprecision_prem
- 32 <http://www.maxonmotor.com/maxon/view/catalog/>
- 33 <http://www.tq-group.com/en/products/product-details/prod/leichtbau-torque-servomotoren/extb/Main/>
- 34 <http://www.load-torque-cells.com/Lebow/index.htm>
- 35 <http://www.sensors.co.uk/torqsense/E200-ORT/>
- 36 <http://www.schunk.com/>
- 37 <http://www.kistler.com/ru/en/product/torque/CMSWB>
- 38 http://cmm.ipu.ru/sites/default/cmm12cd/CD/Papers/Article_final_pdfed_.pdf
- 39 <http://www.rls.si/ru/aksim-off-axis-rotary-absolute-encoder--17584>
- 40 <http://www.inductosyn.com/PDF%20Files/Farrand%20Controls%20Brochure.pdf>
- 41 http://www.elektropribor.spb.ru/prod/rprecision_4
- 42 http://www.vniimem.com/products/beskontaktnye_vrawayuwiesya_transformatory/
- 43 <http://www.mera.spb.ru/article%20>
- 44 http://ruaut.ru/content/novosti/produkcii/absoliytniy_fotoelectricheskiy_datчик_ygla_M071.html
- 45 <http://www.skbis.ru/index.php?p=3&c=5&d=40>
- 46 <http://www.prochip.ru/products/brands/ams/362657>
- 47 <http://www.ams.com/eng/Products/Magnetic-Position-Sensors/Magnetic-Rotary-Position-Sensors>

- 48 http://www.mts.ch/xml_1/internet/de/application/d14/f421.cfm
- 49 <http://www.harmonicdrive.de/english/products/>
- 50 http://aviton.spb.ru/catalog/elektroprivodyi/articles_electroprivodyi/reduktor_harmonic
- 51 <http://www.sumitomo-drive.ru/catalog/11/71/>
- 52 Лавриненко В.В, Карташев И. А., Вишневский В. С. Пьезоэлектрические двигатели. М.: Энергия, 1980 г.
- 53 Фролов Л.Б. Измерение крутящего момента, М.: Энергия, 1967.
- 54 Логинов В.Н. Электрические измерения механических величин. - 2-е изд. - М.: Энергия, 1976. – 104 с.
- 55. <https://www.yumpu.com/en/document/view/13606294/catalog-of-ideas-kuka-robotics>
- 56. <http://robotforum.ru>
- 57. <https://ecotechnica.com.ua/kosmos/1879-kanadskie-roboty-zapolonyat-kosmos.html>
- 58 <https://hi-news.ru/space/rossijskie-roboty-manipulyatory-otpravlyatsya-na-mks-v-2021-godu.html>
- 59. <https://www.popmech.ru/technologies/455982-gde-rabotayut-samye-smelye-roboty/#part1>
- 60. <http://robotforum.ru/promyshlennyye-robotyi/motoman/motoman-hc10dt.html>
- 61. http://exwww.ihep.su/htec/db/product_w.php?d=mttm,g=,p=,i=2,a=2
- 62. <http://yzga.ru/products/manipulyatornaya-tehnika/>
- 63. <http://robotforum.ru/promyshlennyye-robotyi/kuka/kuka-kr-10-r1100-sixx-wp-kr-agilus.html>
- 64. http://www.robots.steelsite.ru/robots_201011261907.php
- 65. <http://dmliefer.ru/ru/content/kuka>
- 66. <http://www.directindustry.com/prod/kuka-roboter/4-axis-robots-palletizing-17587-417286.html>

67. Verification of Advanced Light Weight Robotic Joints and Tele-Presence Concepts for Future Space Missions. K. Landzettel, A. Albu-Schäffer, B. Brunner, A. Beyer, R. Gruber, E. Krämer, C. Preusche, D. Reintsema, J. Schott, B.-M. Steinmetz, H.-J. Sedlmayr, G. Hirzinger . DLR Oberpfaffenhofen Institute of Robotics and Mechatronics D-82234 Wessling Email: Klaus.Landzettel@dlr.de
68. <https://www.federalresources.com/wp-content/uploads/2017/02/irobot-710-kobra-endeavor.jpg>

Смирнов Аркадий Борисович
Тимофеев Андрей Николаевич

ПРОМЫШЛЕННЫЕ И СЕРВИСНЫЕ РОБОТЫ

Учебное пособие