

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

**О. В. ВЕСЕЛОВ**

# **РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Учебное пособие



Владимир 2019

УДК 621.865.8 (075.8)  
ББК 32.966 я73  
В38

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор  
зав. кафедрой инженерной экологии и безопасности жизнедеятельности  
Московского государственного технологического университета  
«Станкин»  
*Л. Э. Шварцбург*

Доктор технических наук, профессор  
зав. кафедрой информатики и защиты информации  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
*М. Ю. Монахов*

**Веселов, О. В.**

В38      Расчет и проектирование мехатронных устройств : учеб.  
пособие / О. В. Веселов ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Сто-  
летовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 168 с.  
ISBN 978-5-9984-0932-5

Изложены вопросы проектирования электромеханических устройств, включающие в себя разработку механической системы, привода и системы управления.

Учебное пособие подготовлено в соответствии с программой курса «Проектирование мехатронных и робототехнических систем» и предназначено для бакалавров и магистров направления подготовки «Мехатроника и робототехника». Может быть использовано студентами других специальностей при изучении соответствующих курсов, выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 30. Табл. 24. Библиогр.: 31 назв.

УДК 621.865.8 (075.8)  
ББК 32.966 я73

ISBN 978-5-9984-0932-5

© ВлГУ, 2019  
© Веселов О. В., 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	5
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ</b> .....	7
1.1. Понятие инженерного проектирования .....	7
1.2. Принципы системного подхода .....	8
1.3. Основные понятия системотехники .....	10
<b>2. СОСТАВ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ</b> .....	12
2.1. Приближение источника движения к исполнительному органу .	12
2.2. Использование специальных более совершенных исполнительных двигателей .....	14
2.3. Совершенствование полупроводниковой элементной базы.....	16
2.4. Расширение функциональных свойств электропривода.....	16
2.5. Увеличение объема информации, поступающей в систему электропривода .....	18
2.6. Развитие систем цифрового и микропроцессорного управления электроприводом.....	18
2.7. Комплектные системы электропривода.....	19
<b>3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ</b> .....	21
3.1. Приведение параметров.....	21
3.2. Расчетные схемы механической части модулей .....	25
3.3. Крутильная податливость валов .....	34
3.4. Уравнение движения механической системы электропривода при жестких кинематических связях .....	42
3.5. Математическое описание МС привода с учетом упругости передач .....	44

<b>4. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА .....</b>	<b>49</b>
4.1. Задание на курсовой проект .....	50
4.2. Варианты заданий.....	51
4.3. Исходные данные к вариантам заданий.....	54
4.4. Разработка технического задания на проектирование .....	56
4.5. Описание конструкции и функционирования мехатронной системы .....	65
4.6. Разработка алгоритма работы мехатронной системы .....	66
4.7. Функциональная схема проектируемой мехатронной системы...	80
4.8. Выбор элементной базы системы управления .....	82
4.9. Разработка принципиальной электрической схемы .....	86
4.10. Разработка программного обеспечения системы управления....	92
4.11. Моделирование .....	93
4.12. Введение и заключение к проекту .....	95
4.13. Оформление пояснительной записки и чертежей.....	96
<b>СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>100</b>
<b>КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....</b>	<b>102</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>104</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для выполнения курсовых проектов и выпускных квалификационных работ студентами специальности «Мехатроника и робототехника» по учебной дисциплине «Проектирование мехатронных и робототехнических систем» и закрепления знаний, полученных при изучении теоретического курса и выполнении практических работ.

Основными задачами проектирования являются:

- закрепление знаний, полученных на лекциях, практических занятиях, при выполнении лабораторных и самостоятельных работ;
- выработка навыков творческого мышления и умения применять обоснованные в технико-экономическом отношении решения инженерных задач;
- формирование профессиональных навыков, связанных с самостоятельной деятельностью будущего специалиста;
- приобщение студентов к самостоятельной работе со специальной и нормативной литературой;
- подготовка студентов к решению комплексных инженерных и исследовательских задач.

Курсовой проект ориентирован в основном на разработку мехатронных устройств и систем различного назначения, курсовое проектирование – завершающий этап в процессе обучения специалиста в области мехатроники и ориентировано:

- на изучение принципов построения и способов технической реализации конструкции МС;
- синтез систем управления и их техническую реализацию, включая разработку электрических принципиальных схем и алгоритмов управления;
- приобретение навыков работы с каталогами на электротехническое оборудование, приборы и средства автоматизации.

При работе над курсовым проектом, тщательно изучив конкретную МС, студент должен правильно поставить задачу и сформулировать технические требования к конструкции и системе управления МС, режимам ее работы.

Основное внимание в проекте необходимо обращать на выбор или разработку алгоритма управления рассматриваемой МС, выбор и размещение преобразователей (датчиков) измерительной информации, применение специализированных вычислительных устройств, разработку схем сигнализации и контроля хода работы МС.

## ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация проектирования занимает особое место среди информационных технологий.

Во-первых, автоматизация проектирования – синтетическая дисциплина, ее составными частями являются многие другие современные информационные технологии. Так, техническое обеспечение систем автоматизированного проектирования (САПР) основано на использовании вычислительных сетей и телекоммуникационных технологий, в САПР применяются персональные компьютеры и рабочие станции, есть примеры применения мейнфреймов. Математическое обеспечение САПР отличается богатством и разнообразием используемых методов вычислительной математики, статистики, математического программирования, дискретной математики, искусственного интеллекта. Программные комплексы САПР относятся к числу наиболее сложных современных программных систем, основанных на операционных системах Unix, Windows-95/NT, языках программирования C, C++, Java и других, современных CALS-технологиях, реляционных и объектно ориентированных системах управления базами данных (СУБД), стандартах открытых систем и обмена данными в компьютерных средах.

Во-вторых, знание основ автоматизации проектирования и умение работать со средствами САПР требуются практически любому инженеру-разработчику. Компьютерами насыщены проектные подразделения, конструкторские бюро и офисы. Работа конструктора за обычным кульманом, расчеты с помощью логарифмической линейки или оформление отчета на пишущей машинке стали анахронизмом. Предприятия, ведущие разработки без САПР или лишь с малой степенью их использования, оказываются неконкурентоспособными как вследствие больших материальных и временных затрат на проектирование, так и из-за невысокого качества проектов.

Появление первых программ для автоматизации проектирования за рубежом и в России относится к началу 60-х гг. XX века. Тогда были созданы программы для решения задач строительной механики, анализа электронных схем, проектирования печатных плат. Дальнейшее развитие САПР шло по пути создания аппаратных и программных средств машинной графики, повышения вычислительной эффективности программ моделирования и анализа, расширения областей применения САПР, упрощения пользовательского интерфейса, внедрения в САПР элементов искусственного интеллекта.

Подготовка инженеров разных специальностей в области САПР включает в себя базовую и специальную компоненты. Наиболее общие положения, модели и методики автоматизированного проектирования входят в программу курса, посвященного основам САПР, детальное изучение техметодов и программ, которые специфичны для конкретных специальностей, предусматривается в профильных дисциплинах.

# 1. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ

## 1.1. Понятие инженерного проектирования

*Проектирование* технического объекта — создание, преобразование и представление в принятой форме образа этого еще не существующего объекта. Образ объекта или его составных частей может создаваться в воображении человека в результате творческого процесса или генерироваться в соответствии с некоторыми алгоритмами в процессе взаимодействия человека и ЭВМ. В любом случае инженерное проектирование начинается при наличии выраженной потребности общества в некоторых технических объектах, которыми могут быть объекты строительства, промышленные изделия или процессы. Проектирование включает в себя разработку технического предложения и (или) технического задания (ТЗ), отражающих эти потребности, и реализацию ТЗ в виде проектной документации.

Обычно ТЗ представляют в виде некоторых документов, и оно является *исходным (первичным) описанием объекта*. Результатом проектирования, как правило, служит полный комплект документации, содержащий достаточные сведения для изготовления объекта в заданных условиях. Эта документация и есть *проект*, точнее *окончательное описание* объекта. Более коротко, проектирование — процесс, заключающийся в получении и преобразовании исходного описания объекта в окончательное описание на основе выполнения комплекса работ исследовательского, расчетного и конструкторского характера.

Преобразование исходного описания в окончательное порождает ряд промежуточных описаний, подводящих итоги решения некоторых задач и используемых для обсуждения и принятия проектных решений для окончания или продолжения проектирования.

Проектирование, при котором все проектные решения или их часть получают путем взаимодействия человека и ЭВМ, называют *автоматизированным*, в отличие от *ручного* (без использования ЭВМ) или *автоматического* (без участия человека на промежуточных этапах): Система, реализующая автоматизированное проектирование, представляет собой *систему автоматизированного проектирования* (в англоязычном написании *CAD System — Computer Aided-Design System*).

Автоматическое проектирование возможно лишь в отдельных частных случаях для сравнительно несложных объектов. Подавляющим в настоящее время является автоматизированное проектирование.

Проектирование сложных объектов основано на применении идей, изложенных в ряде теорий и подходов. Наиболее общим подходом является системный подход, идеями которого пронизаны различные методики проектирования сложных систем.

## 1.2. Принципы системного подхода

Основные идеи и принципы проектирования сложных систем выражены в системном подходе. Для специалиста в области системотехники они являются очевидными и естественными, однако, их соблюдение и реализация зачастую сопряжены с определенными трудностями, обусловливаемыми особенностями проектирования. Как и большинство взрослых образованных людей, правильно использующих родной язык без привлечения правил грамматики, инженеры применяют системный подход без обращения к пособиям по системному анализу. Однако интуитивный подход без применения правил системного анализа может оказаться недостаточным для решения все более усложняющихся задач инженерной деятельности.

Основной общий принцип системного подхода заключается в рассмотрении частей явления или сложной системы с учетом их взаимодействия. *Системный подход включает в себя выявление структуры системы, типизацию связей, определение атрибутов, анализ влияния внешней среды.*

Системный подход рассматривают как направление научного познания и социальной политики. Он является базой для обобщающей дисциплины «*Теория систем*» (другое используемое название - «*Системный анализ*»).

*Теория систем* — дисциплина, в которой конкретизируются положения системного подхода; она посвящена исследованию и проектированию сложных экономических, социальных, технических систем, чаще всего слабоструктурированных.

Характерными примерами таких систем являются производственные системы. При проектировании систем цели достигаются в многошаговых процессах принятия решений. Методы принятия ре-

шений часто выделяют в самостоятельную дисциплину, называемую «Теория принятия решений».

В технике дисциплину, аналогичную теории систем, в которой исследуются сложные технические системы, их проектирование, чаще называют **системотехникой**. Предметом системотехники являются, во-первых, организация процесса создания, использования и развития технических систем, во-вторых, методы, принципы их проектирования и исследования. В системотехнике важно уметь сформулировать цели системы и организовать ее рассмотрение с позиций поставленных целей. Тогда можно отбросить лишние и малозначимые части при проектировании и моделировании, перейти к постановке оптимизационных задач.

Системы автоматизированного проектирования и управления относятся к числу наиболее сложных современных искусственных систем. Их проектирование и сопровождение невозможны без системного подхода. Поэтому идеи и положения системотехники входят составной частью в дисциплины, посвященные изучению современных автоматизированных систем и технологий их применения.

Имеется несколько разновидностей системного подхода, а именно:

- структурный,
- блочно-иерархический,
- объектно-ориентированный подходы.

При **структурном подходе**, как разновидности системного, требуется синтезировать варианты системы из компонентов (блоков) и оценивать варианты при их частичном переборе с предварительным прогнозированием характеристик компонентов.

**Блочно-иерархический подход** к проектированию использует идею распределения сложных объектов и соответственно средств их создания на иерархические уровни и аспекты, вводит понятие стиля проектирования (восходящее и нисходящее), устанавливает связь между параметрами соседних иерархических уровней.

Ряд важных структурных принципов, используемых при разработке информационных систем и, прежде всего их программного обеспечения (ПО), выражен в **объектно-ориентированном подходе** к проектированию (ООП). Такой подход имеет следующие преимущества:

- 1) вносит в модели большую структурную определенность, распределяя представленные данные и процедуры между классами объектов;
- 2) сокращает объем спецификаций благодаря введению в описание иерархии объектов и отношений наследования между свойствами объектов разных уровней иерархии;
- 3) уменьшает вероятность искажения данных вследствие ошибочных действий за счет ограничения доступа к определенным категориям данных в объектах.

Системный подход характеризуется следующими особенностями:

1. **Структуризация** процесса проектирования, выражаемая выделением проектных задач и документации, выделением стадий, этапов, проектных процедур. Эта структуризация является сущностью блочно-иерархического подхода к проектированию.
2. **Итерационный** характер проектирования (многошаговость и повторяемость).
3. **Типизация и унификация** проектных решений и средств проектирования.

### 1.3. Основные понятия системотехники

В теории систем и системотехнике введен ряд терминов, среди них к базовым нужно отнести следующие понятия.

**Система** — множество элементов, находящихся в отношениях и связях между собой.

**Элемент** — такая часть системы, представление о которой нецелесообразно подвергать дальнейшему членению при проектировании.

**Сложная система** — система, характеризующаяся большим числом элементов и, что наиболее важно, большим числом взаимосвязей элементов.

Сложность системы определяется также видом взаимосвязей элементов, свойствами **целенаправленности, целостности, разделения, иерархичности, многоаспектности**. Современные автоматизированные информационные системы и, в частности, системы автоматизированного проектирования, являются сложными в силу наличия у них перечисленных свойств и признаков.

**Подсистема** — часть системы (подмножество элементов и их взаимосвязей), которая имеет свойства системы.

**Надсистема** — система, по отношению к которой рассматриваемая система является подсистемой.

**Структура** — отображение совокупности элементов системы и их взаимосвязей; понятие структуры отличается от понятия самой системы также тем, что при описании структуры принимают во внимание лишь типы элементов и связей без конкретизации значений их параметров.

**Параметр** — величина, выражающая свойство или системы, или ее части, или влияющей на среду системы. Обычно в моделях систем в качестве параметров рассматривают величины, не изменяющиеся в процессе исследования системы. Параметры подразделяют на *внешние*, *внутренние* и *выходные*, выражающие свойства элементов системы, самой системы, внешней среды соответственно. Векторы внутренних, выходных и внешних параметров далее обозначены  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ ,  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  соответственно.

**Фазовая переменная** — величина, характеризующая энергетическое или информационное наполнение элемента или подсистемы.

**Состояние** — совокупность значений фазовых переменных, зафиксированных в одной временной точке процесса функционирования.

**Поведение (динамика) системы** — изменение состояния системы в процессе функционирования.

**Вектор переменных  $V$ , характеризующих состояние** (вектор переменных состояния), — избыточное множество фазовых переменных, задание значений которых в некоторый момент времени полностью определяет поведение системы в дальнейшем (в автономных системах без последствия).

К характеристикам сложных систем часто относят следующие понятия:

**Целенаправленность** — свойство искусственной системы, выражающее назначение системы. Это свойство необходимо для оценки эффективности вариантов системы.

**Целостность** — свойство системы, характеризующее взаимосвязанность элементов и наличие зависимости выходных параметров от параметров элементов, при этом большинство выходных параметров не является простым повторением или суммой параметров элементов.

**Иерархичность** — свойство сложной системы, выражающее возможность и целесообразность ее иерархического описания, т. е. представления в виде нескольких уровней, между компонентами которых имеются отношения целое-часть.

Составными частями системотехники являются следующие основные разделы:

- иерархическая структура систем, организация их проектирования;
- анализ и моделирование систем;
- синтез и оптимизация систем.

**Моделирование** имеет две четко различимые задачи:

- 1 — создание моделей сложных систем (в англоязычном написании — *modeling*);
- 2 — анализ свойств систем на основе исследования их моделей (*simulation*).

**Синтез** также подразделяют на две задачи:

- 1 — синтез структуры проектируемых систем (*структурный синтез*),
- 2 — выбор численных значений параметров элементов систем (*параметрический синтез*). Эти задачи относятся к области принятия проектных решений.

Моделирование и оптимизацию желательно выполнять с учетом статистической природы систем, т. к. детерминированные системы — лишь частный случай.

## 2. СОСТАВ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

В настоящее время существуют устойчивые тенденции развития мехатронных устройств, которые отражают как общие направления развития электротехники и электроники, так и особенности развития станкостроения и робототехники. Рассмотрим наиболее характерные тенденции развития конструкций механической и электромеханической частей мехатронных устройств.

### 2.1. Приближение источника движения к исполнительному органу

Эта тенденция и в приводе подачи станка и в приводе главного движения приводит к упрощению конструкции механической части привода, увеличению ее жесткости, улучшению динамических качеств и повышению кинематической точности промежуточных передач.

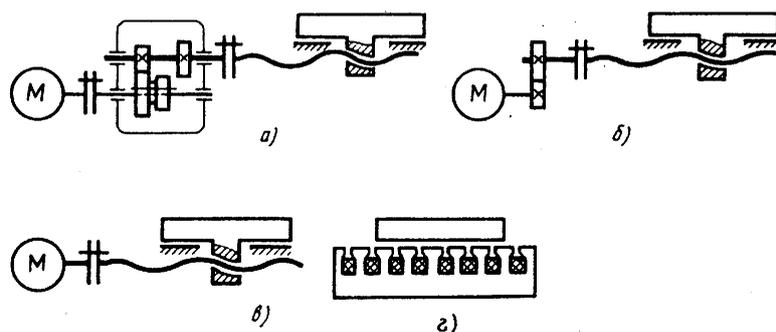


Рис. 2.1. Приближение источника движения к исполнительному органу станка: а — привод с коробкой передач; б — привод с одноступенчатым редуктором; в — прямое соединение двигателя с ходовым винтом; г — линейный электрический двигатель

В приводе подач механические передачи сведены к минимуму и часто вал двигателя непосредственно может быть соединен с ходовым винтом, который является единственным механическим устройством преобразования вращательного движения в поступательное. Применение линейных двигателей позволяет устранить и этот рудиментарный элемент и приложить электромеханические усилия к поступательно движущемуся узлу станка.

Аналогичные тенденции наблюдаются и в приводе главного движения. Однако полное исключение, механических передач ограничивается малым диапазоном регулирования электропривода с постоянной мощностью.

Исключение механических передач (коробок скоростей и коробок подач станков) возможно только при широком диапазоне регулирования скорости.

Механические передачи задерживают и существенно сглаживают низкие частоты, возникающие в приводе, поэтому редуктор с небольшим передаточным отношением по этой причине может быть полезным. В приводе роботов редуктор сохраняется, поскольку исключение механических передач и применение тихоходных двигателей, как правило, увеличивает его размеры и массу. В электромеханических ПР двигатель и редуктор встраивают в сочленение звеньев.

Важное значение имеет разработка электромагнитных механизмов для вспомогательных движений в станках. Функциональные, фиксирующие и другие движения могут быть осуществлены путем

использования прямоходовых или поворотных электромагнитов с соответствующей системой управления.

## **2.2. Использование специальных более совершенных исполнительных двигателей**

Доля специальных двигателей, предназначенных для станков и ПР, непрерывно увеличивается. Для станков необходимы двигатели, способные обеспечить необходимые статические и динамические характеристики на всем диапазоне регулирования скорости, который достигает десятков тысяч. Двигатели для станков не должны быть энергонасыщены во избежание передачи на станок тепловых и механических возмущений.

Важным условием является оснащение двигателей вспомогательными информационными и управляющими устройствами, такими, как тахогенератор, датчик угла (резольвер), тормоз и тепловая защита.

**В приводе подачи** высокоавтоматизированных станков и ПР применяют двигатели следующих типов:

1. Двигатели постоянного тока традиционного исполнения с улучшенными статическими и динамическими характеристиками, имеющими уменьшенный момент инерция якоря, повышенную перегрузочную способность и улучшенную коммутацию.
2. Малоинерционные двигатели постоянного тока, в которых рекордное быстродействие обеспечивается за счет продольного снижения момента инерции якоря. Наиболее распространены двигатели с дисковым якорем, имеющим печатную или штампованную обмотку, и двигатели с гладким цилиндрическим якорем, у которых длина больше диаметра. Во всех случаях такие якоря обладают малой массой, что уменьшает постоянную времени нагрева и исключает длительную работу машины с моментом нагрузки, превышающим номинальный. Малоинерционные двигатели, так же как и двигатели традиционного исполнения, соединяют с ходовым винтом станка через промежуточную механическую передачу.
3. Высокомомментные двигатели — это тихоходные двигатели постоянного тока с возбуждением от постоянных магнитов. Массивный якорь обеспечивает термическую инерционность и как следствие, возможность длительно работать с большим перегрузочным момен-

том (такие двигатели допускают 6—10-кратную перегрузку по моменту). Особенностью этих двигателей является возможность приводить в движение ходовой винт станка, минуя промежуточные механические передачи.

Электропривод подачи с высокомоментными двигателями обеспечивает диапазон регулирования скорости порядка нескольких тысяч.

Использование постоянных магнитов обеспечивает постоянство магнитного потока в динамических режимах и высокий динамический момент. Высокомоментные двигатели не имеют потерь в цепи возбуждения и по размерам меньше, чем аналогичные двигатели с электромагнитным возбуждением. Однако отсутствие дополнительных полюсов приводит к коммутационным ограничениям по нагрузке и скорости, что заставляет применять зависимое токоограничение, при котором допустимая нагрузка уменьшается по мере возрастания скорости.

4. Дальнейшим развитием конструкции машин постоянного тока являются бесконтактные двигатели, представляющие собой синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов и инвертором, управляемым специальным датчиком в зависимости от угла поворота ротора. В бесконтактных двигателях устранен коллекторно-щеточный узел, что повышает срок службы двигателя и снимает коммутационные ограничения по моменту и скорости.

5. Линейные электродвигатели в станкостроении применяют редко. В большинстве случаев их рабочие характеристики (тяговая сила и линейная скорость) не соответствуют требованиям технологического процесса. Исключение составляют малые станки и ПР. Основное применение линейные двигатели должны найти в электроприводе вспомогательных перемещений.

6. Область применения дискретных (шаговых) двигателей постепенно сужается. В настоящее время шаговые двигатели в приводе подачи станков с ЧПУ применяют редко. Вместе с тем на современных станках есть немало видов движений, которые удобно осуществлять с помощью шаговых двигателей (малые периодические дозируемые подачи в станках шлифовальной группы, движения, связанные с компенсацией износа инструмента, точные угловые перемещения и др.).

7. В настоящее время регулируемый электропривод на основе асинхронного двигателя базируется на серийных двигателях. В дальней-

шем станкостроению обязательно потребуются двигатель, предназначенный для работы в широком диапазоне изменения скорости и оснащенный вспомогательными устройствами и датчиками обратной связи.

**В приводе главного движения** станка основное значение имеет нерегулируемый асинхронный короткозамкнутый двигатель. Значительную роль играют двигатели постоянного тока с электромагнитным возбуждением в регулируемом электроприводе с двухзонным управлением. Здесь также необходимы электродвигатели с расширенным диапазоном регулирования изменением магнитного потока, что позволит полностью отказаться от механического регулирования скорости при постоянной мощности и значительно упростить конструкцию станка.

### **2.3. Совершенствование полупроводниковой элементной базы**

Совершенствование электропривода тесно связано с развитием полупроводниковой техники, являющейся базой для создания силовых преобразователей и схем управления. Происходит непрерывное улучшение технических характеристик тиристоров, которые являются основным силовым элементом электропривода, но обладают ограниченным управлением. Создаются более перспективные, полностью управляемые транзисторные силовые преобразователи. Непрерывное повышение степени интеграции полупроводниковых устройств выражается в создании силовых полупроводниковых модулей, что позволяет повысить надежность преобразователя, уменьшить его размеры и упростить монтаж. Важным направлением развития элементной базы является создание специализированных интегральных схем для системы управления приводом. Такие схемы включают в себя устройства управления силовыми тиристорами, регуляторы привода, блоки токоограничения и др.

### **2.4. Расширение функциональных свойств электропривода**

Функции, которые выполняет электропривод, непрерывно расширяются. Если раньше электропривод считался источником равномерного движения, а все сложные взаимосвязанные перемещения формообразования выполнялись механизмом станка, то в настоящее время положение резко изменилось.

В современных станках редко применяют мальтийские кресты, неполные зубчатые колеса и другие сложные механизмы для движений с остановками и точным позиционированием, так как их функции выполняет электропривод. При этом гибкая система управления обеспечивает оптимальные значения ускорений в электромеханической системе станка при необходимой точности позиционирования.

Электропривод все в большей степени контролирует и ограничивает нагрузки в элементах конструкции станка, что позволяет предотвратить его аварию, контролировать поломку инструмента, уровень силового воздействия в зажимных устройствах и др.

Повышение быстродействия и точности электропривода приводит к тому, что все большее число сложных взаимосвязанных движений деталей и инструмента осуществляется только с помощью электропривода. Наиболее распространенной является функциональная связь нескольких приводов подачи. Такие связи следящих приводов широко используют в станках с ЧПУ. Более сложные функциональные зависимости осуществляют для связи привода главного движения и подачи. В этом случае привод подачи должен обладать превосходными динамическими характеристиками.

Задача обеспечения взаимосвязанных движений с помощью электропривода решена не полностью. Здесь необходимо учесть высокую точность обработки деталей, которая характеризуется относительной погрешностью  $10^{-4} \dots 10^{-6}$ , что накладывает соответствующие требования на точность воспроизведения электроприводом управляющих движений. Кроме того, для получения качественного изделия необходимо обеспечить инвариантность привода к многочисленным возмущениям, сопутствующим технологическому процессу. Механические кинематические цепи обладают несомненным преимуществом – высокой динамической жесткостью, и системы электропривода уступают им в этом отношении. Дальнейшее развитие принципа инвариантности, создание приводов с комбинированным управлением, несомненно, позволят ликвидировать этот недостаток.

Важным направлением является адаптивное управление, повышающее производительность и точность обработки. В системах адаптивного управления обычно стабилизируют один из параметров технологического процесса, например силовой фактор (силу, момент

или мощность резания). При этом скорость привода подачи регулируется так, чтобы поддерживать заданный режим работы главного привода. В более сложных системах управления изменяют одновременно скорости главного привода и привода подачи. При этом достигается максимум некоторого показателя эффективности с учетом ограничений по стойкости инструмента, жесткости конструкции станка и др.

## **2.5. Увеличение объема информации, поступающей в систему электропривода**

Совершенствование систем автоматизированного электропривода связано с непрерывным увеличением объема перерабатываемой информации. Информационные устройства (датчики) в системе электропривода можно разбить на несколько групп. Наибольшее значение имеют датчики параметров движения: скорости и перемещений или угла поворота вала. В системах адаптивного управления необходимо обрабатывать информацию о скорости резания, подаче, перемещениях и деформациях элементов станка, силах резания. Используется также информация, характеризующая режим работы системы электропривода: напряжение сети, ток двигателя и нагрев обмоток. Специфика метрологического обеспечения электропривода связана с огромным диапазоном регулирования скорости. Датчики параметров движения (пути и скорости) имеют лучшие метрологические характеристики в верхней части этого диапазона, на которой осуществляются малоточные вспомогательные перемещения. Рабочие подачи относят к нижней части диапазона регулирования скорости, но здесь точностные параметры датчиков значительно хуже.

Таким образом, дальнейшее совершенствование электропривода тесно связано с проблемой создания датчиков обратной связи, имеющих одинаковые метрологические характеристики на всем диапазоне регулирования скорости.

## **2.6. Развитие систем цифрового и микропроцессорного управления электроприводом**

Развитие систем ЧПУ, проникновение микропроцессорной техники в область управления станками оказывают большое влияние на структуру и технические средства электропривода. Возникает несоот-

ветствие между цифровой системой управления станком и аналоговой формой управления в системе электропривода, которое усугубляется наличием импульсного элемента, каковым является тиристорный силовой преобразователь. В результате информация многократно преобразуется из аналоговой формы в цифровую и обратно, что приводит к неизбежным искажениям сигналов и потере точности в системе управления.

Поэтому вполне естественно появление цифрового электропривода, полностью информационно согласованного с системой управления станком. Такой привод может быть осуществлен только на микропроцессорной основе. Электропривод с микропроцессорным управлением характеризуется повышенной точностью, отсутствием дрейфа нуля усилителей, гибкостью системы управления, универсальностью и простотой сопряжения с управляющей ЭВМ, высокой надежностью и возможностью диагностики.

Однако на пути создания цифровых электроприводов возникают трудности, связанные с недостаточным быстродействием микропроцессоров. Преодолеть их можно как путем использования более быстродействующих устройств, так и путем перехода на многопроцессорные системы с параллельной обработкой информации. Применение микропроцессоров позволяет создать новые системы управления электроприводом станков. Это сложные системы управления электроприводом, аппаратная реализация которых затруднена из-за большого числа элементов и громоздкости алгоритма управления.

Огромные возможности открываются перед микропроцессорами при создании самонастраивающихся и оптимальных систем управления станочным электрооборудованием, в электроприводе с моделью, электроприводе с переменной структурой и т. п. современных системах управления.

## **2.7. Комплектные системы электропривода**

Современный электропривод станков и ПР выполняется в виде комплекта электрооборудования. Тенденция комплектной поставки (продажи) электрооборудования развивается в двух направлениях. Во-первых, увеличивается число электроприводов (осей), включаемых в комплект. Вполне естественно, что в комплект входят привод

главного движения и все приводы подачи, обеспечивающие многокоординатное перемещение. Подобный подход имеет большие организационные и эксплуатационные преимущества.

Во-вторых, увеличивается объем комплекта. Идеи комплектной поставки, с одной стороны, распространяются на все большую часть электромеханической системы привода. Появляются устройства, которые включают в себя электродвигатель, редуктор, соединительную муфту и ходовой винт, т. е. по существу все электромеханическое устройство, преобразующее электрическую энергию в энергию механического поступательного перемещения. С другой стороны, происходит интеграция системы управления электроприводом с системой управления технологическим процессом обработки, и в комплект электрооборудования включаются многие узлы, предназначенные для этой цели.

Развитие программируемых средств управления позволяет надеяться, что со временем оба эти направления сольются в единый, включающий все энергетические и информационные элементы электрооборудования.

Всякую механическую систему можно представить, приведенной расчетной схемой, состоящей из дискретных инерционных элементов, соединенных между собой упругими связями, и обладающими тем же энергетическим запасом, что и реальная система.

В приведенной схеме все инерционные элементы осуществляют один вид движения, вращательное или поступательное. Между ними существует упругая связь.

Если приведение производится к какому-нибудь валу механизма, то полученная расчетная схема вращательной системы характеризуется крутящим моментом  $M$ , моментами инерции  $J$ , коэффициентом жесткости при кручении  $C_{кр}$ .

При приведении к поступательному движению расчетная схема характеризуется силой  $F$  (нагрузка), массой  $m$  (инерционность), коэффициентом жесткости  $C_{л}$  (линейная жесткость).

Приведение дискретных инерционных элементов выполняется исходя из равенства кинетических энергий приводимого и приведенного инерционного элементов; приведение коэффициента жесткости — из условия равенства потенциальных энергий.

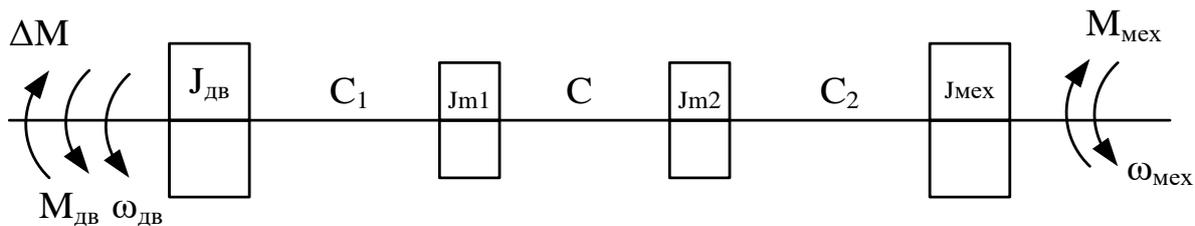


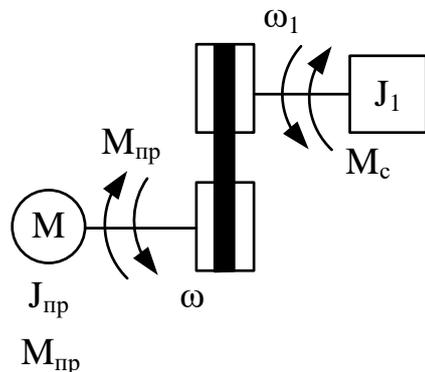
Рис. 2.2. Эквивалентная расчетная механическая схема

### 3. МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

#### 3.1. Приведение параметров

##### Приведенный момент сопротивления

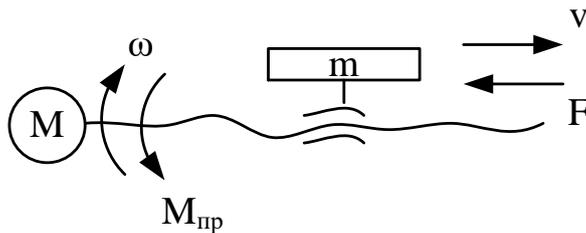
Приведенный момент сопротивления для вращательного движения, для рассматриваемой схемы, рассчитывается из равенства входного и выходного произведений момента и угловой скорости.



Если считать, что при преобразовании момента мощность остается неизменной ( $M_{пр}\omega = M_c\omega_1$ ), то

$$M_{пр} = M_c \frac{\omega_1}{\omega} = M_i / i.$$

Приведенный момент сопротивления для поступательного движения рассчитывается аналогично.



$$M_{np}\omega = Fv$$

$$M_{np} = \frac{Fv}{\omega} = F\rho,$$

$\frac{v}{\omega} = \rho$  – радиус приведения.

$\rho$  – можно определить и через перемещение, т.е.  $\frac{x}{y}$ , где  $x$  – линейное,  $y$  – угловое.

$$M_{np} = \frac{Fh}{2\pi}, \text{ т.к. } y=2\pi, \text{ а } x=h \text{ и}$$

$$\rho = \frac{h}{2\pi}, \text{ где } h \text{ – шаг винта.}$$

### Приведение моментов инерции

Исходя из сохранения кинетической энергии моменты инерции рассчитываются следующим образом.

Вращательное движение

$$J_{np} \omega^2 / 2 = \frac{J_1 \omega_1^2}{2}$$

$$J_{np} = \frac{J_1 \omega_1^2}{\omega^2} = \frac{J_1}{i^2}$$

Для поступательного движения

$$J_{np} = \frac{mv^2}{\omega^2} = m\rho^2$$

Механизм винт-гайка

$$J = m\left(\frac{h}{2\pi}\right)^2$$

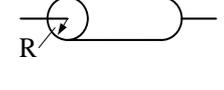
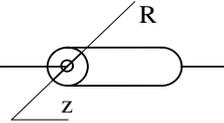
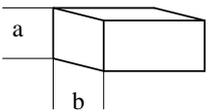
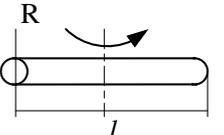
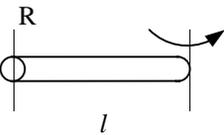
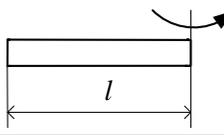
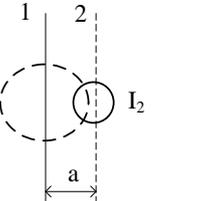
При жестких связях общий момент инерции на валу двигателя:

$$J = J_{np} + J_{дв}, \quad J_{дв} = \frac{GD^2}{4}.$$

Если  $GD^2$  – маховой момент ЭД, то  $J_d = 2.5GD^2$  [кГм<sup>2</sup>], где  $r$  и  $D$  – радиус и диаметр инерции ротора;  $G$  – масса ротора.

Таблица 3.1

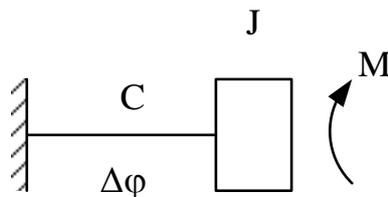
**Моменты инерции простых тел**

	$J = \frac{mR^2}{2}$
	$J = \frac{m(R^2+z^2)}{2}$
	$J = \frac{m(a^2+b^2)}{12}$
	$J = \frac{m(l^2+3R^2)}{12}$
	$J = \frac{m}{\frac{l^2}{3} + \frac{R^2}{4}}$
	$J = \frac{ml^2}{3}$
	$J_1 = J_2 + ma^2$

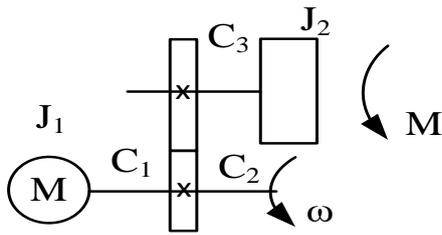
**Приведенная жесткость механической передачи**

1. Длинный вал, один конец которого закреплен, а на втором расположена сосредоточенная масса.

$C = \frac{M}{\Delta\varphi}$  – крутильная жесткость.



2. Под действием момента  $M$  суммарный угол поворота



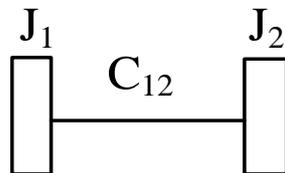
$$\Delta\varphi_{np} = \Delta\varphi i$$

$$M_{np} = M/i$$

$$C_{np} = \frac{M_{np}}{\Delta\varphi_{np}} = \frac{C}{i^2}$$

$C_1$  – жесткость 1-го вала,  $C_2$  – жесткость редуктора,  $C_3$  – жесткость 2-го вала.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_3^n = \frac{M_{np}}{C_1} + \frac{M_{np}}{C_2} + \frac{M_{np}}{C_3^n} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3^n}\right)M_{np}$$



3. Для линейных деформаций:  $\Delta l = \frac{F}{C_l}$

$\Delta l$  – линейная деформация.

Исходя из равенства потенциальных энергий при вращательном и поступательном движении:

$$\frac{C_l(\Delta l)^2}{2} = \frac{C_{np}(\Delta\varphi)^2}{2}$$

$$C_{np} = C_l \left(\frac{\Delta l}{\Delta\varphi}\right)^2 = C_l \rho^2$$

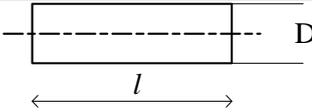
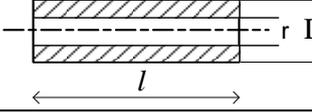
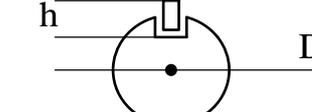
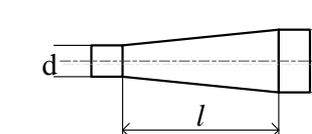
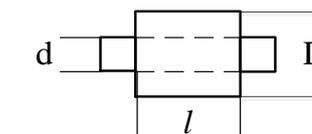
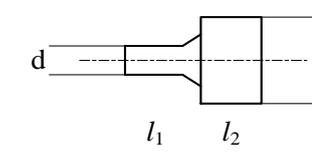
Для ходового винта:

$$C_{np} = C_l \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 = \frac{ES}{l} \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2,$$

где  $E$  – модуль упругости;

$S$  – сечение и  $l$  – длина ходового винта.

**Крутильная жесткость**

Тип	Схема	Крутильная жесткость
Вал		$\frac{\pi g D^4}{32 l}$
Вал с отверстием		$\frac{\pi g D^4 - d^4}{32 l}$
Вал со шпонкой		$\frac{\pi g d^4}{32 k_u l} \quad k_u = 1 + 10 \left(\frac{h}{D}\right)$
Конический вал		$\frac{\pi g d^4}{32 k l}$ $k = \frac{d}{30} \left[ 1 + \frac{d}{D} + \left(\frac{d}{D}\right)^2 \right]$
Вал со втулкой		$\frac{\pi g k D^4}{32 l}$ $k = \left(\frac{d}{30}\right)^4 + \frac{g^*}{g} \left(1 - \frac{d^4}{D^4}\right)$
Ступенчатый вал		$\frac{\pi g}{32} \frac{1}{\frac{l_1}{d^4} + \frac{l_2}{D^4} + x}$ $x = \frac{1}{8d^3} \left[ 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^3 \right]$

**3.2. Расчетные схемы механической части модулей**

Кинематические схемы модулей.

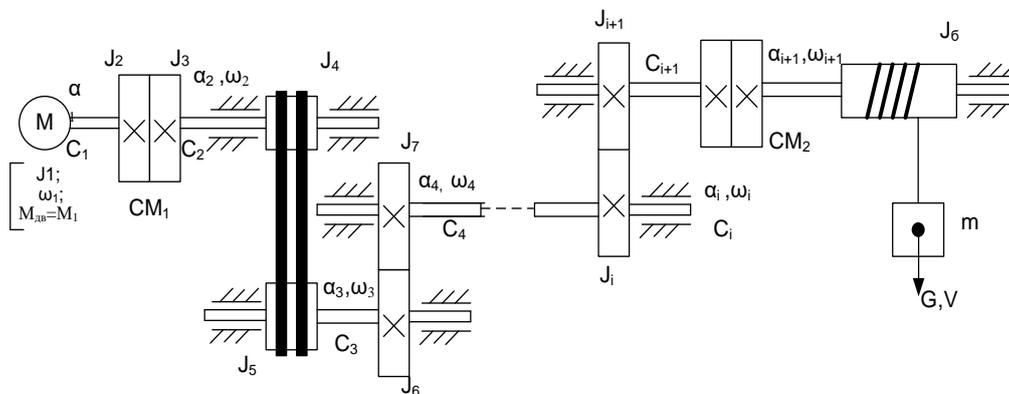


Рис. 3.2. Сложная механическая система

В зависимости от особенностей общей конструкции модуля, связанной с ограничениями пространственного расположения узлов компоновка механизмов организована так, как показано на рисунке 3.3.

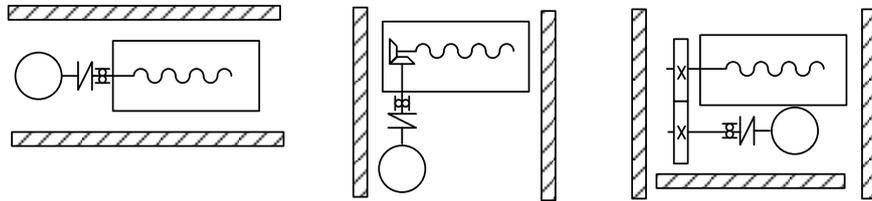
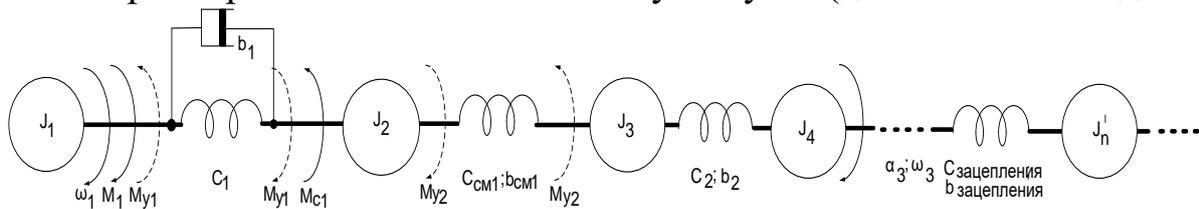


Рис. 3.3. Компоновки механизмов на объекте

### Расчетная схема механической части

На первом этапе примем некоторые допущения: будем полагать, что момент инерции  $J$  или масса  $m$  элементов неизменны; все упругие связи подчиняются закону Гука  $M_{\text{упр}i} = C_i \Delta \varphi_i$ ;  $F_{\text{упр}j} = C_j \Delta S_j$ ; жесткости  $C_i$ ,  $C_j$  – постоянны; зазоры в механических передачах, фрикционные параметры и внешние связи отсутствуют (движение свободное).



$$\delta \left[ \frac{H}{\text{см}^2} \right] = E \left[ \frac{H}{\text{см}^2} \right] \cdot \frac{\Delta l}{l},$$

где,  $E$  – модуль упругости.

В связи с наличием клиноременных и зубчатых передач различные элементы движутся с разными скоростями. Поэтому сопоставить их  $J_i$ ,  $m_j$ ; жесткость связей  $C_i$ ,  $C_j$ ; перемещения  $\Delta \alpha_i$ ,  $\Delta S_i$  и т.п. невозможно!

Как следствие, для составления расчетных схем механических частей необходимо приведение всех параметров ( $J$ ,  $m$ ,  $\omega$ ,  $\alpha$ ,  $M$ ,  $F$ , ...) элементов кинематической цепи к одной расчетной скорости.

Наибольшее удобство представляет приведение их к скорости ЭД, или, особенно, при поступательном движении РО – к скорости выходной координаты привода.

## Приведение масс, сил, моментов, перемещений, скоростей и жесткости.

Условием соответствия (адекватности) приведенной расчетной схемы реальной механической части ЭП является выполнение закона сохранения энергии (при приведении необходимо обеспечить сохранение запаса кинетической и потенциальной энергии системы, а также элементарной работы всех действующих в системе сил и моментов на возможных перемещениях).

а) Приведение моментов движения (сопротивления) и моментов инерции при вращательном движении (осуществляется на основе условия сохранения неизменной величины элементарной работы на возможных перемещениях или мощности).

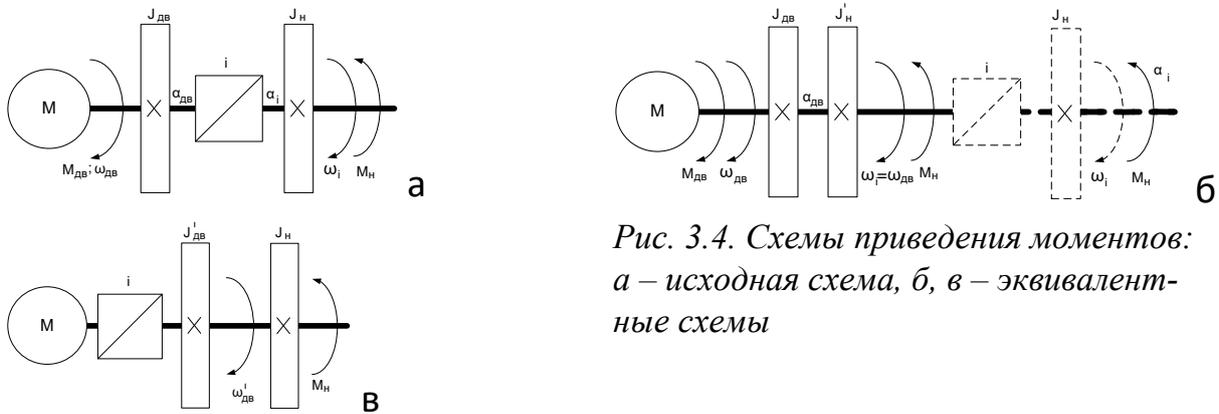


Рис. 3.4. Схемы приведения моментов: а – исходная схема, б, в – эквивалентные схемы

$$M_H \delta \alpha_i = M'_H \delta \alpha_{\partial\partial}; \quad M_H \omega_i = M'_H \omega_{\partial\partial}$$

$$M_H = M'_H \frac{\delta \alpha_i}{\delta \alpha_{\partial\partial}} = M'_H \frac{\omega_i}{\omega_{\partial\partial}} = \frac{M'_H}{i} \quad (3.1)$$

где,  $i$  – передаточное отношение между валом двигателя и выходным валом.

Т.е.  $M_{нагр.}$  при приведении к валу ЭД уменьшается.

$$i = \frac{\delta \alpha_{\partial\partial}}{\delta \alpha_i} = \frac{\omega_{\partial\partial}}{\omega_i};$$

$$\text{т.е. } \alpha_H = \alpha_{\partial\partial} / i; \quad \omega_H = \omega_{\partial\partial} / i;$$

Примечание 1: приведение момента двигателя к выходному валу

$$M_{\partial\partial} \delta \alpha_{\partial\partial} = M'_{\partial\partial} \delta \alpha_i; \quad M_{\partial\partial} \omega_{\partial\partial} = M'_{\partial\partial} \omega_i$$

$$M'_{\partial\partial} = M_{\partial\partial} \frac{\delta \alpha_{\partial\partial}}{\delta \alpha_i} = M_{\partial\partial} \frac{\omega_{\partial\partial}}{\omega_i} = M_{\partial\partial} i \quad (3.2)$$

т.е.  $M_{дв}$  увеличивается при приведении к выходному валу.

Приведение моментов инерции осуществляется исходя из сохранения запаса кинетической энергии при переносе момента инерции.

$$\text{а) } \frac{J_H \omega_i^2}{2} = \frac{J'_H \omega_{\partial\epsilon}^2}{2};$$

$$J'_H = J_H \left(\frac{\omega_i}{\omega_{\partial\epsilon}}\right)^2 = \frac{J_H}{i^2} \quad (3.3)$$

б) перенос (приведение)  $J_{\text{дв}}$

$$\frac{J_{\partial\epsilon} \omega_{\partial\epsilon}^2}{2} = \frac{J'_{\partial\epsilon} \omega_i^2}{2};$$

$$J'_{\partial\epsilon} = J_{\partial\epsilon} \left(\frac{\omega_{\partial\epsilon}}{\omega_i}\right)^2 = J_{\partial\epsilon} i^2 \quad (3.4)$$

б) Приведение сил движения (сопротивления) и масс при поступательном движении (при линейных кинематических связях)

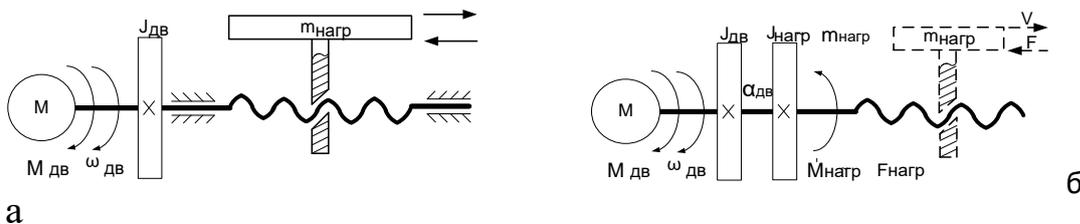


Рис. 3.5. Однокоординатная механическая система: а – исходная схема, б – эквивалентная схема

$$F_{\text{нагр}} \delta S_i = M'_{\text{нагр}} \delta \alpha_{\partial\epsilon}; \quad F_{\text{нагр}} V_i = M'_{\text{нагр}} \omega_{\partial\epsilon}$$

$$M'_{\text{нагр}} = F_{\text{нагр}} \frac{\delta S_i}{\delta \alpha_{\partial\epsilon}} = F_{\text{нагр}} \frac{V_i}{\omega_{\partial\epsilon}} = F_{\text{нагр}} \rho, \quad (3.5)$$

где  $\rho = \frac{\delta S_i}{\delta \alpha_{\partial\epsilon}}$  - радиус приведения, отсюда  $\delta S_i = \rho \cdot \delta \alpha_{\partial\epsilon}$ ;  $\delta \alpha_{\partial\epsilon} = \frac{\delta S_i}{\rho}$

Приведение момента двигателя к выходному валу

$$M_{\partial\epsilon} \delta \alpha_{\partial\epsilon} = F'_{\partial\epsilon} \delta S_i; \quad M_{\partial\epsilon} \omega_{\partial\epsilon} = F'_{\partial\epsilon} V_i$$

$$F'_{\partial\epsilon} = M_{\partial\epsilon} \frac{\delta \alpha_{\partial\epsilon}}{\delta S_i} = M_{\partial\epsilon} \frac{\omega_{\partial\epsilon}}{V_i} = M_{\partial\epsilon} \frac{1}{\rho} \quad (3.6)$$

Приведение масс нагрузки к валу двигателя  $\frac{m_H V_i^2}{2} = \frac{J'_H \omega_{\partial\epsilon}^2}{2};$

$$m'_{\partial\epsilon} = J_{\partial\epsilon} \left(\frac{\omega_{\partial\epsilon}}{V_i}\right)^2 = \frac{J_{\partial\epsilon}}{\rho^2} \quad (3.7)$$

Приведение момента инерции  $J_{дв}$  к выходному валу ЭП

$$\frac{J_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}}^2}{2} = \frac{m'_{\text{дв}} V_i^2}{2};$$

$$J'_H = m_H \left( \frac{V_i}{\omega_{\text{дв}}} \right)^2 = m_H \rho^2 \quad (3.8)$$

Иногда при приведении моментов инерции учитываются потери в передачах, что неверно, т.к. кинетическая энергия с потерями энергии не связана.

Примечание 1:  $J = mr^2 [\text{кгМ}^2]$ ;

### Момент инерции тел

Суммарный момент инерции приведен к валу двигателя

$$\begin{cases} J_{\sum \text{вращ.движ}} = J_{\text{дв}} + J'_H = J_{\text{дв}} + \frac{J_H}{i^2}; \\ J_{\sum \text{пост.движ}} = J_{\text{дв}} + J'_H = J_{\text{дв}} + m_H \rho^2. \end{cases} \quad (3.9)$$

Если  $i$  и  $\rho$  механизма имеет переменное значение, то  $J_{\text{прив}} = \text{var}$ .

а) Синусный кулачковый механизм.

Если  $\omega = \text{const}$ , то масса  $m$  перемещается по закону:

$$X = R \sin \varphi = R \sin(\omega t) \text{ со скоростью } V_x = \frac{dx}{dt} = \omega R \cos \omega t.$$

Радиус приведения

$$\rho = \frac{V_x}{\omega} = \frac{\omega R \cos \varphi}{\omega} = R \cos \varphi = \text{var}$$

Тогда,

$$J_{\text{привед}} = m \rho^2 = m R^2 \cos^2 \varphi = \text{var}$$

б) Двухзвенное ИУ робота (двигатели массой  $m_1, m_2$  – расположены в шарнирах  $O_1, O_2$ ;  $J_1, J_2$  – моменты инерции масс  $m_1, m_2$ ).

Для первой массы:  $\rho_1 = l_1 = \text{const}$ ;

$$J_{\text{привед1-й масс}} = J_1 + m_1 l_1^2 = \text{const};$$

Для второй массы:

$$\begin{aligned} \rho_2^2 &= [l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]^2 + [l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)]^2 = \\ &= l_1^2 \cos^2 \varphi_1 + 2l_1 l_2 \cos \varphi_1 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) + \\ &+ l_2^2 \cos^2(\varphi_1 + \varphi_2) + l_1^2 \sin^2 \varphi_1 + 2l_1 l_2 \sin \varphi_1 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) + \\ &+ l_2^2 \sin^2(\varphi_1 + \varphi_2) = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos \varphi_2. \end{aligned}$$

Примечание:  $\cos(x - y) = \cos x \cos y + \sin x \sin y$

Тогда  $J_{\text{привед2-й массы}} = J_2 + m_2(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_2)$ .

Следовательно, общий приведенный момент инерции является переменным

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{пр1-й массы}} + J_{\text{пр2-й массы}} = J_1 + J_2 + m_1l_1^2 + m_2(l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2 \cos \varphi_2) = J_{\text{пр}}(\varphi_2)$$

в) Если передаточное устройство работает в режиме прямого и обратного хода, то вводится понятие динамического передаточного отношения  $\chi$ .

$$\chi = \begin{cases} \frac{1}{\eta_{\text{нх}}} \forall M_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}} > 0 \wedge M_{\text{н}} \omega_{\text{н}} < 0; \\ \frac{\eta_{\text{ох}}}{i} \forall M_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}} < 0 \wedge M_{\text{н}} \omega_{\text{н}} > 0. \end{cases}$$

Приведенный момент инерции нагрузки к валу двигателя, определяется следующим образом:

Для прямого хода:

$$M'_{\text{ДИНн}} \omega_{\text{дв}} = M_{\text{ДИНн}} \omega_{\text{н}} \frac{1}{\eta_{\text{нх}}};$$

$$M'_{\text{ДИНн}} = \frac{M_{\text{ДИНн}} \omega_{\text{н}}}{\omega_{\text{дв}} \eta_{\text{нх}}} = \frac{M_{\text{ДИНн}}}{i \eta_{\text{нх}}};$$

$$J'_n \dot{\omega}_{\text{дв}} = \frac{J_n \dot{\omega}_{\text{н}}}{i \eta_{\text{нх}}};$$

$$J'_n = J_n \frac{1}{i^2 \eta_{\text{нх}}}.$$

Для обратного хода:

$$M'_{\text{ДИНн}} \omega_{\text{дв}} = M_{\text{ДИНн}} \omega_{\text{н}} \eta_{\text{ох}};$$

$$J'_n = \frac{J_n}{i^2} \eta_{\text{ох}}.$$

$$\text{Следовательно, } J'_n = f(\chi) = \begin{cases} \frac{J_n}{\eta_{\text{нх}} i^2} \forall M_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}} > 0 \wedge M_{\text{н}} \omega_{\text{н}} < 0; \\ \frac{J_n \eta_{\text{ох}}}{i^2} \forall M_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}} < 0 \wedge M_{\text{н}} \omega_{\text{н}} > 0. \end{cases}$$

$$M'_{\text{ДИНн}} = f(\chi) = \begin{cases} \frac{M_{\text{ДИНн}}}{\eta_{\text{нх}} i} \forall M_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}} > 0 \wedge M_{\text{н}} \omega_{\text{н}} < 0; \\ \frac{M_{\text{ДИНн}} \eta_{\text{ох}}}{i} \forall M_{\text{дв}} \omega_{\text{дв}} < 0 \wedge M_{\text{н}} \omega_{\text{н}} > 0. \end{cases}$$

## Упругость механической части ЭП

Будем считать, что входящие в состав механической части ЭП валы, зубчатые зацепления, шпоночные соединения и т.п. имеют упругие деформации, подчиняющиеся закону Гука.

Момент  $M_y$ , приложенный к упругой связи, при этом равен

$$M_y = C\Delta\varphi [H \cdot м],$$

где,  $C = \frac{M_y}{\Delta\varphi} \left[ \frac{H \cdot м}{рад} \right]$  - жесткость упругого кинематического звена;

$\Delta\varphi$  - деформация упругого кинематического звена.

Динамическая жесткость

$$C(t) = \frac{M_y(t)}{\Delta\varphi(t)} \quad C_{дин} = \frac{dM}{d\omega}$$

Приведение жесткости

а)

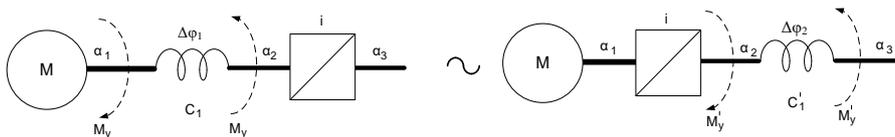


Рис.3.6. Схемы приведения моментов: а – исходная схема, б – эквивалентная схема

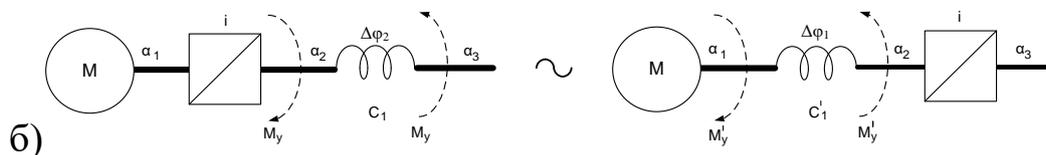
Из равенства потенциальной энергии

$$\frac{C_1(\Delta\varphi_1)^2}{2} = \frac{C'_1(\Delta\varphi_2)^2}{2};$$

$$C'_1 = C_1 \left( \frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_2} \right)^2 = C_1 i^2 \quad (3.10)$$

$$M'_y = C'_1 \Delta\varphi_2 = M_y i = C_1 \Delta\varphi_1 i = C_1 \Delta\varphi_2 i i = C'_1 \Delta\varphi_2$$

где,  $C'_1 = C_1 i^2$ .



б)

Рис. 3.7. Схемы приведения моментов: а – исходная схема, б – эквивалентная схема

$$\frac{C_2(\Delta\varphi_2)^2}{2} = \frac{C'_2(\Delta\varphi_1)^2}{2};$$

$$C'_2 = C_2 \left( \frac{\Delta\varphi_2}{\Delta\varphi_1} \right)^2 = \frac{C_2}{i^2} \quad (3.11)$$

$$M'_y = C'_2 \Delta\varphi_1 = M_y \frac{1}{i} = \frac{C_2 \Delta\varphi_2}{i} = \frac{C_2 \Delta\varphi_1}{ii} = C'_2 \Delta\varphi_1,$$

где  $C'_2 = \frac{C_2}{i^2}$ .

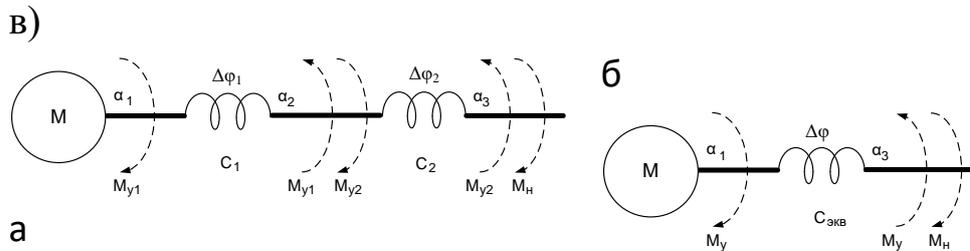


Рис. 3.8 Схемы приведения моментов: а – исходная схема, б – эквивалентная схема

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \frac{M_n}{C_1} + \frac{M_n}{C_2} = \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) M_n = \frac{1}{C_{\text{экв}}} M_n,$$

где,  $C_{\text{экв}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$  - эквивалентная жесткость;

$\frac{1}{C_{\text{экв}}}$  - эквивалентная податливость.

Г)

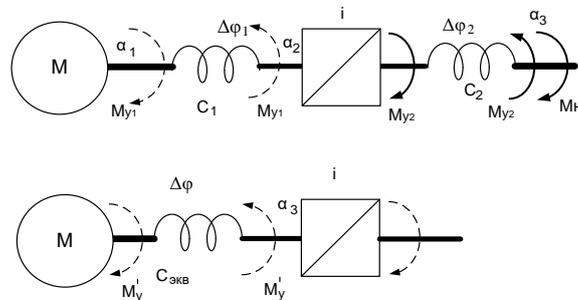


Рис. 3.9 Схемы приведения моментов: а – исходная схема, б – эквивалентная схема

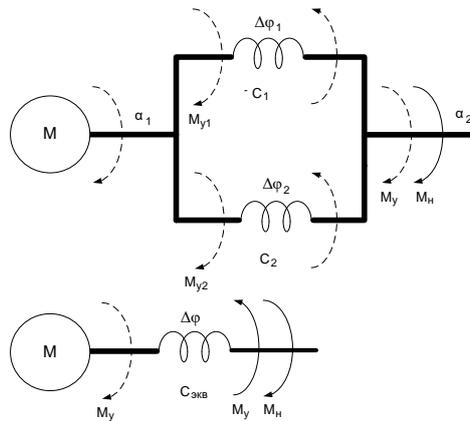
$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi'_2 = \frac{M'_n}{C_1} + \frac{M'_n}{C'_2} = \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C'_2} \right) M'_n,$$

где  $M'_n = \frac{M_n}{i}$ ;  $C'_2 = \frac{C_2}{i^2}$ .

Тогда

$$\Delta\varphi' = \frac{1}{C_{\text{экв}}} M'_n \quad (3.12)$$

где,  $C_{\text{экв}} = \frac{C_1 C_2'}{C_1 + C_2'}$



д)

Рис.3.10 Схемы приведения моментов: а – исходная схема, б – эквивалентная схема

$$C_{\text{экв}} = C_1 + C_2. \quad (3.13)$$

е) жесткость при линейных деформациях

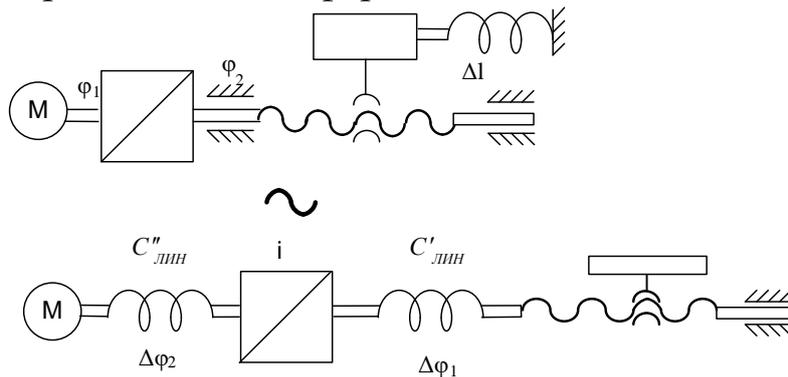


Рис. 3.11 Схема приведения при линейном движении: а – исходная схема, б – эквивалентная схема

Исходя из равенства потенциальной энергии при поступательно-вращательном движении

$$\frac{C_{\text{лин}} (\Delta l)^2}{2} = \frac{C'_{\text{лин}} (C'_{\text{вращ}}) (\Delta \varphi_1)^2}{2} = \frac{C''_{\text{лин}} (C''_{\text{вращ}}) (\Delta \varphi_2)^2}{2};$$

$$C'_{\text{лин}} = C_{\text{лин}} \left( \frac{\Delta l}{\Delta \varphi_1} \right)^2 = C_{\text{лин}} \rho^2 \quad (3.14)$$

где,  $C_{\text{лин}}$  – жесткость при линейной деформации.

$$C''_{\text{лин}} = \frac{C'_{\text{лин}}}{i^2} = C_{\text{лин}} \frac{\rho^2}{i^2}$$

(3.15)

где,  $C'_{лин}$  – жесткость при вращательной деформации.

Для ходового винта

$$C_{вращ.х.в.} = C_{лин.х.в.} \left( \frac{t}{2\pi} \right)^2 = \frac{ES}{l} \left( \frac{t}{2\pi} \right)^2,$$

где  $E \left[ \frac{H}{см^2} \right]$  - модуль упругости материала;

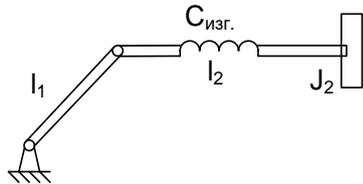
$S, l$  – сечение и длина ходового винта.

Для двухстепенного ИУ

$$C_{изг.(к валуЭД)} = C_{изг} \rho^2(\varphi_2) \quad (3.16)$$

Т.е. приведенная жесткость представляет собой нелинейную функцию угла поворота второго звена.

Для двухзвенного ИУ  $M_{прив} = M'_{дин}(\varphi_2, \chi) + M'_{упр}(\varphi_2)$



$$M_{\sum прив} = M_{\sum дин} + M_{\sum упруг., изгиб. прив} =$$

$$M_{\sum дин.} (J_{пр}(\varphi_2, \chi)) + M_{\sum упруг., изгиб. деф. прив}(\varphi_2) + M_{\sum упруг., крут. деф}(\chi)$$

### 3.3. Крутильная податливость валов

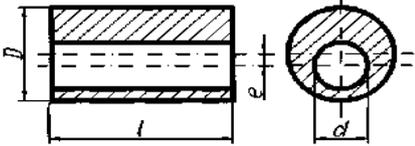
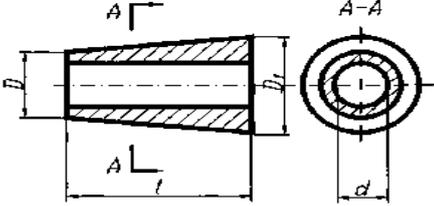
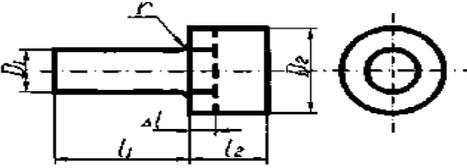
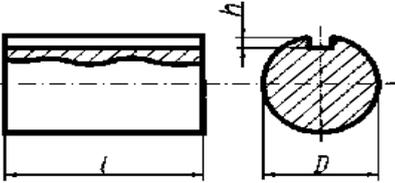
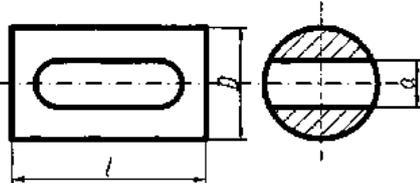
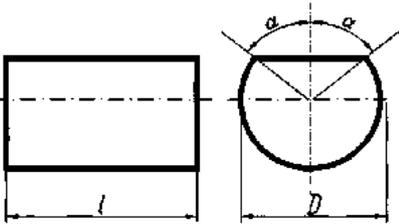
Податливостью участка вала называется выраженный в радианах угол относительного поворота концевых сечений этого участка при приложении к ним единичного крутящего момента

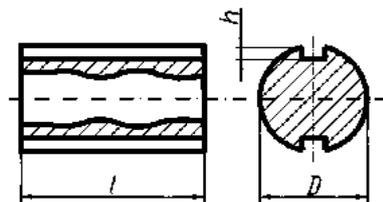
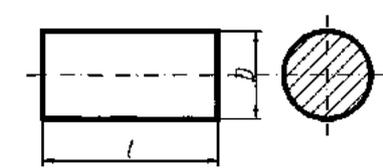
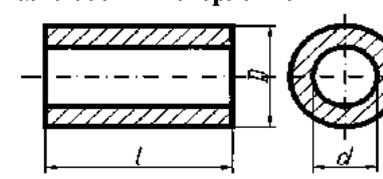
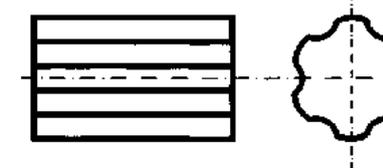
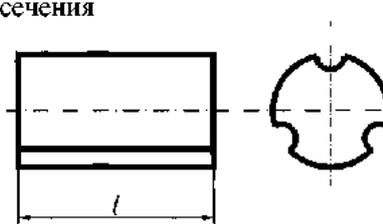
$$e = \frac{d\varphi}{dM} \quad (3.17)$$

Крутильная податливость участка вала определяется по формуле  $e = \frac{32}{\pi G} \frac{lk_{\phi}}{d^4}$ , рад/Нм (3.18)

где  $l$  - длина участка вала, м;  $d$  - наружный диаметр вала, м;  $G$  - модуль упругости материала вала при сдвиге;  $G = 8,5 \cdot 10^9$  Н/м - для стали;  $G = 4,5 \cdot 10^9$  Н/м - для чугуна;  $G = 2,7 \cdot 10^9$  Н/м - для алюминия;  $k_{\phi}$  коэффициент формы поперечного сечения,  $k_{\phi} = (1 - 4)^{-1}$  - для цилиндрического сплошного круглого вала,  $k_{\phi} = (1 - 2^4)^{-1}$  - для цилиндрического круглого вала с концентричным сверлением, где  $a = d_1 \setminus d$  - отношение внутреннего и наружного диаметров;  $k_{\phi} = \lambda^{-1} (1 - 2^4)^{-1}$  - для цилиндрического круглого вала с эксцентричным сверлением.

## Податливости простых тел

Эскиз	$e_k$ [рад/(Н·м)]
<p>Вал с эксцентричным сверлением</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{kl}{D^4 - d^4}$ $k = 1,25 \text{ при } \frac{d}{D} = 0,4$ $\frac{2e}{D - d} = 0,6$ $k = 1,75 \text{ при } \frac{d}{D} = 0,5$
<p>Конический вал с отверстием</p> 	$\frac{320}{3\pi G} \cdot \frac{Dl}{D_1(D^4 - d^4)} \times$ $\times \left( 1 + \frac{D}{D_1} + \frac{D^2}{D_1^2} \right)$
<p>Ступенчатый вал с галтелью</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \left( \frac{l_1 + \Delta l}{D_1^4} + \frac{l_2}{D_2^4} \right)$ $r \leq \frac{D_1}{4}$
<p>Вал со шпоночной канавкой</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{l}{(D - 0,5h)^4}$
	$k = 4 \text{ при } \frac{a}{D} = 0,2; \frac{l}{D} = 5$ $k = 6 \text{ при } \frac{a}{D} = 0,3; \frac{l}{D} = 4$
<p>Вал с лыской</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{kl}{D^4}$ $k = 1,8 \text{ при } \alpha = 60^\circ$ $k = 1 \text{ при } \alpha = 30^\circ$ $k = 2,5 \text{ при } \alpha = 70^\circ$

<p>Вал с двумя шпоночными канавками</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{l}{(D-1,2h)^4}$
<p>Сплошной круглый вал</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{l}{D^4}$
<p>Вал с осевым сверлением</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{l}{D^4 - d^4}$
<p>Шлицевый вал</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{l}{D^4}$
<p>Шлицевый вал произвольного сечения</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{4I_p l}{F^4}$ <p><math>J_p</math> – полярный момент инерции сечения; <math>F</math> – площадь сечения</p>
<p>Вал с поперечной прорезью</p> 	$\frac{320}{\pi G} \cdot \frac{kl}{D^4}$

### Крутильная податливость шпоночных и шлицевых соединений

Податливость шлицевых и шпоночных соединений обуславливается деформациями контактных поверхностей, предполагается пропорциональной нормальным давлениям

$$e = \frac{k_{ш}}{d^2 l h z}, \text{ рад/Н}\cdot\text{м}, \quad (3.19)$$

где  $d$  – диаметр соединения (для шлицевых соединений - средний диаметр по шлицам), м;  $l$  – длина соединения, м;  $h$  – рабочая высота шлица (шпонки), м;  $z$  – число шпонок (шлицев);  $k_{ш}$  – коэффициент удельной контактной податливости, м<sup>3</sup>/Н;  $k_{ш} = 6,5 \cdot 10^{-11}$  – для соединения с

призматической шпонкой,  $k_{ш} = 13,9 \cdot 10^{-11}$  - для соединения с сегментной шпонкой.  $k_{ш} = 4,1 \cdot 10^{-11}$  - для шлицевого соединения.

Примечание: так как нормальное давление распределяется неравномерно по длине шпонок и шлицев, то расчетную длину вала при определении крутильной податливости следует принимать как расстояние между точками, которые являются центрами эпюр крутящих моментов по длине соединений.

### Крутильная податливость соединительных муфт

Податливость кулачковых муфт определяется контактной податливостью кулачков

$$e_{км} = \frac{4k_1}{D_{ср}^2 k_2 z h b}, \text{ рад / Нм}, \quad (3.20)$$

где  $D_{ср}$  - средний диаметр муфты по кулачкам, м;  $z$  - число кулачков;  $b$  и  $h$  - рабочая ширина и высота кулачка, м;  $k_1$  -  $(0,3 \dots 0,4) \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/Н - коэффициент контактной податливости;  $k_2 = (0,3 \dots 0,5)$  - коэффициент, учитывающий фактическое количество кулачков, передающих крутящий момент.

Примечание: при определении податливости вала шпоночные канавки учитываются лишь в том случае, если они выходят из-под ступицы. Так как крутящий момент распределяется по длине контакта в шлицевом соединении неравномерно, то расчетную длину  $l_p$  вала принимают равной расстоянию между точками приложения равнодействующих эпюр крутящих моментов на длине контакта шлицев.

Расчетная длина для шлицевых валов  $l_b$  в случае посадок с зазором будет определяться по формуле

$$l = l_0 + 0,3(l_1 + l_2), \text{ м} \quad (3.21)$$

а для посадок с натягом

$$l = l_0 + 0,25(l_1 + l_2), \text{ м} \quad (3.22)$$

Благодаря большой контактной податливости шпоночного соединения расчетную длину берут по серединам ступиц колес и шкивов.

При расчете податливости муфт с резиновыми упругими элементами следует учитывать разную жесткость резины при статическом нагружении  $k_{ст}$  и при колебаниях  $k_{дк}$ . Динамический коэффициент  $k_{дин} = k_{дк}/k_{ст}$  зависит от состава резины и амплитуды колебаний. От таких же свойств зависит демпфирование резины: относительное рассеяние  $\Psi$  или логарифмический декремент затухания колебаний  $\theta$ .

Среднее значение  $k_{\text{дин}} = 2 \dots 2,5$ ;  $\Psi = 0,6$ ;  $\theta = 0,5$  в диапазоне частот от 0,1 до 200 Гц.

Податливость упругих втулочно-пальцевых муфт определяется по эмпирической зависимости

$$e_{\text{эмп}} = \frac{0,16 \cdot 10^{-5}}{k_{\text{дин}} \sqrt{H^3} d_{\text{max}}^3}, \text{ рад / Нм}, \quad (3.23)$$

где  $d_{\text{max}}$  - наибольший диаметр соединенных валов, м;  $H = 7,4$  HRD-твердость резины по Шору.

Податливость муфт с резиновой звездочкой рассчитывается по зависимости

$$e_{\text{мз}} = \frac{k \cdot 10^{-5}}{K_{\text{дин}} \sqrt{H^3} D^3}, \text{ рад / Нм}, \quad (3.24)$$

где  $D$ - номинальный наружный диаметр муфты, м;  $K = 10$  для  $D = (0,025 \dots 0,040)$  м,  $K = 4,5$  для  $D = (0,05 \dots 0,1)$  м.

### **Крутильная податливость ременных передач**

Крутильная податливость ременной передачи является результатом деформации ремня под действием окружной силы. Вследствие того, что ремень подвергается предварительному натяжению, окружная сила воспринимается обеими его ветвями и только в случае высоких передаваемых нагрузок, превышающих двойную величину предварительного натяжения  $P_0$ , вся нагрузка воспринимается одной ветвью передачи.

Приведенная крутильная податливость ременной передачи получается из выражения

$$e_p = \frac{l_{\text{эф}}}{\alpha R^2 E F}, \text{ рад / Нм}, \quad (3.25)$$

где  $R$ - радиус шкива, к которому приводится крутильная податливость всей передачи;  $l_{\text{эф}}$  - расчетная длина ветви между шкивами, м;  $F$ - площадь сечения ремня, м<sup>2</sup>;  $E$  - модуль упругости ремня, МПа;  $\alpha$ - коэффициент, учитывающий условия работы передачи:  $\alpha = 2$  при  $P < 2P_0$ ;  $\alpha = 1$  при  $P > 2P_0$

$$l_{\text{эф}} \approx l + \frac{v}{100} (R_1 \alpha_1 + R_2 \alpha_2) \frac{2(R_1 + R_2)^2}{L} \quad (3.26)$$

где  $v$ - скорость ремня, м/с;  $R_1$  и  $R_2$  - радиусы шкивов, м;  $L$ - межосевое расстояние, м;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - углы охвата, рад;  $l$  - расстояние между точками касания ремня со шкивами, м.

Значения модуля упругости для всех типов применяемых ремней приведены в табл. 4.

Таблица 4. Типы ремней

Профиль ремня	Материал	Модуль упругости (МПа)
Плоский ремень	Прорезиненная ткань	80...120
	Хлопчатобумажная ткань	30...60
	Высокополимерные материалы	2250...3800
Зубчатый ремень	Со стальным кордом	6000...39000
Клиновые ремни	Хлопчатобумажный корд	80...120
	Кордотканевые	250...400
	Шнуровой корд из волокна анид	600...800

### Учет изгибной податливости валов и податливости опор

В зубчатых передачах нагрузка на зубчатые колеса сопровождается изгибом валов и упругой деформацией опор, что приводит к дополнительным взаимным поворотам зацепляющихся зубчатых колес. Эту взаимную податливость можно рассчитать, если поместить эквивалентные упругие звенья между сосредоточенными, соответствующими зубчатым колесам звеньями.

### Эквивалентная крутильная податливость

Эквивалентная крутильная податливость определяется по приведенной ниже последовательности:

1. Определяются силы, действующие на зубчатые колеса

$$P_k = \frac{M_{кр}}{R_k} \sqrt{1 + tg^2(\alpha + \rho)}, \text{ Н}$$

где  $R_k$  радиус начальной окружности  $k$ -го зубчатого колеса, м;  $M_{кр}$ , передаваемый колесом крутящий момент. Н\*м:  $\alpha$ - угол зацепления (принимается равным  $20^\circ$ );  $\rho$ - угол трения ( $tg\rho = 0.1$ ;  $\rho \sim 5.71^\circ$ ).

2. Определяется  $u_k$ - суммарный прогиб вала под зубчатым колесом от всех сил  $P_k$ , действующих на данный вал (черта сверху указывает на векторный характер величины).

3. Вычисляется перемещение  $\delta_k$   $k$ -го зубчатого колеса, вызванное податливостью опор

$$\delta_i = (\delta_b - \delta_a) + \frac{a}{a+b} \delta_a = \delta_b \left( \frac{a}{a+b} \right) + \delta_a \left( \frac{a}{a+b} \right)$$

где  $\delta_a = e_{oa} P_A$ ,  $\delta_b = e_{ob} P_B$ ,  $P_A$ ,  $P_B$ - суммарная реакция от сил  $P$ , в опорах А и В, Н;  $e_{oa}$ ,  $e_{ob}$  - податливость опоры А и В, рад/Н м

4. Полное линейное перемещение зубчатого колеса рассчитывается по формуле

$$\bar{\Delta}_i = y_i + \delta_i, \text{ м} \quad (3.27)$$

5. Относительное смещение колес  $i$  и  $i+1$ , передаваемых крутящий момент с одного вала на другой рассчитывается по формуле

$$\Delta_{i,i+1} = \Delta_i - \Delta_{i+1}, \text{ м} \quad (3.28)$$

Примечание: относительное смещение является векторной величиной, следовательно, может иметь положительное или отрицательное направление в зависимости от направления выбранной оси.

6. Расчет взаимного угла поворота зубчатых колес, приведенного к  $i$ -му колесу и вызванному относительным смещением на величину  $\Delta_{i,i+1}$

$$\alpha_i = \frac{\Delta^{-T}_{i,i+1} + \Delta^{-R}_{i,i+1} \operatorname{tg}(\alpha + \rho)}{R_i}, \text{ рад} \quad (3.29)$$

где  $\Delta^{-T}_{i,i+1}$  и  $\Delta^{-R}_{i,i+1}$  - соответственно тангенциальная и радиальная проекция вектора  $\Delta_{i,i+1}$ , м;  $R_i$  - радиус начальной окружности шестерни, к валу которой приводится податливость, м.

7. Определение эквивалентной крутильной податливости

$$e_{\text{экв}} = \frac{\Delta^{-T}_{i,i+1} + \Delta^{-R}_{i,i+1} \operatorname{tg}(\alpha + \rho)}{R_i^2 P_i^2} \text{ рад/Нм} \quad (3.30)$$

где  $P_i^T$  - окружная сила на зубчатых колесах  $i$  и  $i+1$ , Н.

8. Определение податливости опор с подшипниками качения.

Податливость опор зависит от типа, серии и размера, от конструктивного решения, посадок и технологии обработки монтажных поверхностей. Податливость таких опор определяется упругим сближением  $\delta'_i$  тел качения и колец, и контактными деформациями  $\delta''_i$  в местах посадки колец на вал и в корпус.

Для однорядовых шарикоподшипников  $\delta'$  определяется по формулам:

$$\delta' = (0,7 - 2d) 10^{-6} [P/10]^{2/3}, \text{ м.} \quad (3.31)$$

для роликовых подшипников

$$\delta' = k_{\text{ш}} P^* 10^{-2}, \text{ м.} \quad (3.32)$$

При расчете роликовых подшипников:

$$k_{\text{ш}} = \frac{0,52 \cdot 10^{-9}}{d} \text{ - для нормальной серии}$$

$$k_{\text{ш}} = \frac{0,33 \cdot 10^{-9}}{d} \text{ - для широких серий}$$

$k_{ш} = \frac{0,65 \cdot 10^{-9}}{d}$  - для подшипников с короткими роликами

$k_{ш} = \frac{0,4 \cdot 10^{-9}}{d}$  - для двухрядных роликоподшипников

Деформацию  $\delta^n$  рассчитывают по формуле

$$\delta^n = \frac{4Pk_{кп}}{\pi db} (1+d/D), \text{ м.} \quad (3.33)$$

где  $k_{кп}$  -  $(1..2,5) \cdot 10^{-12}$  м<sup>3</sup>/Н - коэффициент контактной податливости.

Примечание: во всех приведенных выше формулах  $P$  - нагрузка на подшипник, кг;  $d$ ,  $D$ ,  $b$  - соответственно внутренний, наружный диаметры и ширина подшипника, м.

### **Податливость зубчатой передачи, приведенная к крутильной податливости**

Данная деформация определяется изгибными и контактными деформациями зубьев. Приведенная к одному из валов крутильная податливость зубчатой передачи выражается формулой

$$e_{пз} = \frac{k_3}{bR^2 \cos^2 \alpha}, \text{ рад / Нм,}$$

где  $b$  - рабочая ширина колеса, м;  $\alpha$  - угол зацепления, рад;  $R$  - радиус начальной окружности зубчатого колеса, расположенного на валу, к которому приводится податливость передачи, м;  $k_3$  - упругая деформация пары зубьев действию единичного нормального давления, приложенного на единицу ширины зуба;  $k_3 = 6 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н - для стальных прямозубых колес;  $k_3 = 3, 6 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н - для стальных косозубых колес;  $k_3 = 4, 4 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/Н - для стальных шевронных колес.

Примечание: для конических колес  $R$  - среднее значение радиуса начальной окружности.

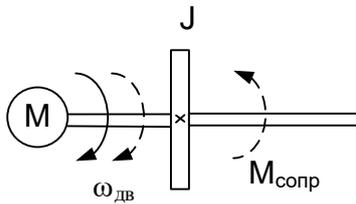
### **Полная эквивалентная крутильная податливость**

Для определения полной эквивалентной крутильной податливости зубчатых передач  $e^n_{экр}$  необходимо знать эквивалентную крутильную податливость  $e^n_{экр}$  передачи и податливость зубчатой передачи, приведенной к крутильной податливости  $e_{пз}$

$$e^n_{экр} = e'_{экр} + \delta_{пз}, \text{ рад/Нм} \quad (3.34)$$

Примечание: в итоге данного этапа расчетов должны получиться полные эквивалентные крутильные податливости зубчатых передач всего рассчитываемого механизма (по каждому валу отдельное значение) и полные моменты инерции каждого вала, состоящие из суммы приведенных моментов инерции колес участвующих в передаче крутящего момента, т.е. колеса, получающие и передающие вращение.

### 3.4. Уравнение движения механической системы электропривода при жестких кинематических связях



Если  $C \rightarrow \infty$ , то эквивалентная расчетная схема имеет следующий вид

$$J = J_{\text{дв}} + J',$$

где  $J'$  - приведенный момент инерции механизма и нагрузки.

$$M_{\text{дв}}(\omega) - M_{\text{сопр}}(\omega) = M_{\text{дин}}, \quad (3.35)$$

где  $M_{\text{дин}} = J \frac{d\omega}{dt}$ .

Если  $J = \text{const}$ , то решение уравнения (1) позволит определить закон движения ЭМС

$$\omega(t) = \int \frac{M_{\text{дв}}(\omega) - M_{\text{сопр}}(\omega)}{J} dt$$

В случае переменного момента инерции  $J = J(\varphi)$  определяем  $M_{\text{дин}}$  на основе уравнения Лагранжа второго рода:

$$M_{\text{дин}} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_k}{\partial \omega} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial \varphi},$$

где  $W_k = J(\varphi) \frac{\omega^2}{2}$ .

$$\frac{\partial W_k}{\partial \omega} = J(\varphi) \omega;$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_k}{\partial \omega} \right) = J(\varphi) \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ(\varphi)}{dt} = J(\varphi) \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{d\varphi}{dt} = J(\varphi) \frac{d\omega}{dt} + \omega^2 \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi};$$

$$\frac{\partial W_k}{\partial \varphi} = \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} \cdot \frac{\omega^2}{2}.$$

Следовательно,

$$M_{\text{дин}} = J(\varphi) \frac{d\omega}{dt} + \omega^2 \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} - \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} = J(\varphi) \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ(\varphi)}{d\varphi} \quad (3.36)$$

Уравнение статического режима ( $\frac{d\omega}{dt} = 0, \omega = \text{const}$ ) имеет следующий вид

$$M_{\text{дв}}(\omega) - M_{\text{сопр}}(\omega) = 0 \quad (3.37)$$

Решение уравнений (1)...(3) (значение  $\omega$  установившегося режима работы) находится как точка пересечения механических характеристик двигателя  $M_{\text{дв}}(\omega)$  и механизма  $M_{\text{сопр}}(\omega)$ .

Привод может работать в установившемся режиме при условии, если он обладает статической устойчивостью.

Условие статической устойчивости

$$\frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{M_{\text{дин}}}{\Delta \omega} < 0. \quad (3.38)$$

При малых приращениях скорости  $\Delta \omega$  реальные механические характеристики могут быть заменены прямыми линиями.

Тогда

$$\Delta M_{\text{дв}} = \beta \Delta \omega;$$

$$\Delta M_{\text{сопр}} = \beta_c \Delta \omega;$$

$$M_{\text{дин}} = \Delta M_{\text{дв}} - \Delta M_{\text{сопр}} = (\beta - \beta_c) \Delta \omega.$$

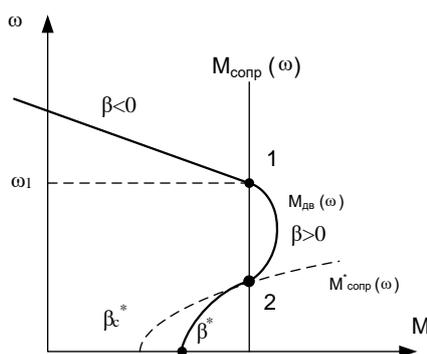
В этом случае условие (1) преобразуется к виду

$$\frac{M_{\text{дин}}}{\Delta \omega} = \frac{(\beta - \beta_c) \Delta \omega}{\Delta \omega} = (\beta - \beta_c) < 0$$

или  $\beta < \beta_c$  (3.39)

Если  $M_{\text{сопр}} = \text{const}$ , то  $\beta_c = 0$  и условие статической устойчивости принимает вид

$$\beta < 0 \quad (3.40)$$



Так, при асинхронном ЭД получаем:

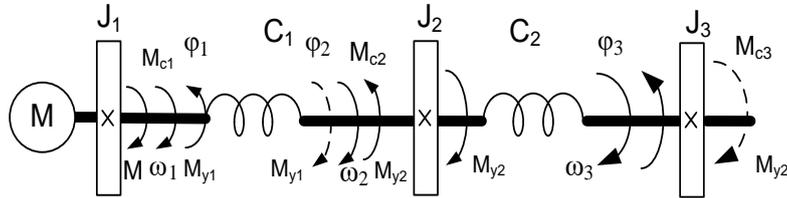
Т.1 соответствует устойчивому режиму работы (ЭД вращается со скоростью  $\omega_1 = \text{const}$ )

Т.2 соответствует неустойчивому режиму работы. Если  $M_{\text{сопр}}(\omega)$  имеет вид  $M^*_{\text{сопр}}(\omega)$ , то в т.2  $(\beta^* - \beta^*_c) < 0$ . Следовательно, в т.2 привод обладает статической устойчивостью

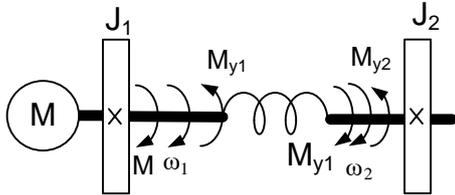
### 3.5. Математическое описание МС привода с учетом упругости передач

Обобщенные расчетные механические схемы электропривода:

- трехмассовая схема



- двухмассовая схема



Механическая часть ЭП – система твердых тел, на движение которых наложены ограничения, определяемые *механическими связями*. Уравнения механических связей устанавливают соотношения между перемещениями в системе, а в тех случаях, когда задаются соотношения между скоростями ее элементов, соответствующие уравнения обычно интегрируются.

В системах с голономными связями число независимых переменных – обобщенных координат, определяющих положение системы – равно числу степеней свободы системы.

Общая форма записи дифференциальных уравнений движения плоских систем – уравнения Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i \quad (3.41)$$

где,  $W_k$  – запас кинетической энергии системы;  $q_i, \dot{q}_i$  – обобщенные координаты и скорости;  $Q_i = \frac{\delta A_i}{\delta q_i}$  – обобщенная сила, определяемая суммой элементарных работ  $\delta A_i$  всех действующих сил на возможном перемещении  $\delta q_i$ .

Если все действующие на систему силы являются потенциальными, то уравнения Лагранжа используются в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (3.42)$$

где,  $L = W_k - W_{\Pi}$  – функция Лагранжа.

Получим уравнения движения обобщенных расчетных схем.

Трехмассовая упругая система.

Обобщенная координата – угловые перемещения масс  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , а обобщенные скорости  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ :

$$\left. \begin{aligned} W_k &= \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2} + \frac{J_3 \omega_3^2}{2}; \\ W_{\Pi} &= \frac{C_1 (\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} + \frac{C_2 (\varphi_2 - \varphi_3)^2}{2} \end{aligned} \right\} \quad (3.43)$$

Для определения  $Q_1$  найдем элементарную работу всех моментов на возможном перемещении  $\delta \varphi_1$ :

$$\delta A_1 = (M - My_1 - Mc_1) \delta \varphi_1,$$

где,  $My_1 = C_1 (\varphi_1 - \varphi_2)$

Следовательно,

$$Q_1 = M - My_1 - Mc_1 \quad (3.44)$$

Аналогично,

$$\left. \begin{aligned} Q_2 &= My_1 - My_2 - Mc_2; \\ Q_3 &= My_2 - Mc_3; \\ My_2 &= C_2 (\varphi_2 - \varphi_3). \end{aligned} \right\} \quad (3.45)$$

В результате дифференцирования  $W_k$  из (3.43) с учетом (3.41), (3.42), (3.44) и (3.45) получаем следующую систему уравнений движения:

$$\left. \begin{aligned} M - Mc_1 - My_1 &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ My_2 - Mc_2 - My_2 &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \\ My_2 - Mc_3 &= J_3 \frac{d\omega_3}{dt}. \end{aligned} \right\} \quad (3.46)$$

Структурная схема системы:

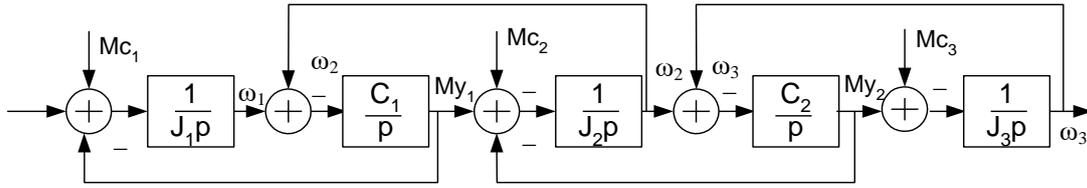


Рис. 12.Трехмассовая механическая система: управляющее воздействие – электромагнитный момент  $M$  двигателя; возмущающее воздействие – моменты сопротивления  $Mc1$ ;  $Mc2$ ;  $Mc3$ ; регулируемые переменные:  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ,  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ ,  $My_1, My_2, My_3$ .

Передаточная функция механической части привода по управляющему воздействию при выходной переменной  $\omega_1(p)$ :

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{P(p)}{pQ(p)},$$

где,  $P(p) = J_2 J_3 p^4 + [C_2(J_2 + J_3) + C_1 J_3] p^2 + C_1 C_2$ ;

$Q(p) = p\{J_1 J_2 J_3 p^4 + [J_1 C_2(J_2 + J_3) + J_3 C_1(J_1 + J_2)] p^2 + C_1 C_2(J_1 + J_2 + J_3)\}$ .

$$W_{\omega_2}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{C_1 J_3 p^2 + C_1 C_2}{pQ(p)};$$

$$W_{\omega_3}(p) = \frac{\omega_3(p)}{M(p)} = \frac{C_1 C_2}{pQ(p)}.$$

Если выходная переменная – момент упругих деформаций, то

$$W_{My_1}(p) = \frac{My_1(p)}{M(p)} = \frac{C_1 J_2 J_3 p^2 + C_1 C_2 (J_1 + J_3)}{pQ(p)}$$

В соответствии с полученными передаточными функциями строятся АФЧХ, АЧХ, ФЧХ.

Система управлений для двухмассовой схемы механики ЭП получаем из (6) при условии  $My_2=0$ ,  $Mc_3=0$ ,  $J_1=0$

$$\left. \begin{aligned} M - Mc_1 - My_1 &= J_1 \frac{d\omega_1}{dt}; \\ My_2 - Mc_2 &= J_2 \frac{d\omega_2}{dt}; \end{aligned} \right\} \quad (3.47)$$

Структурная схема:

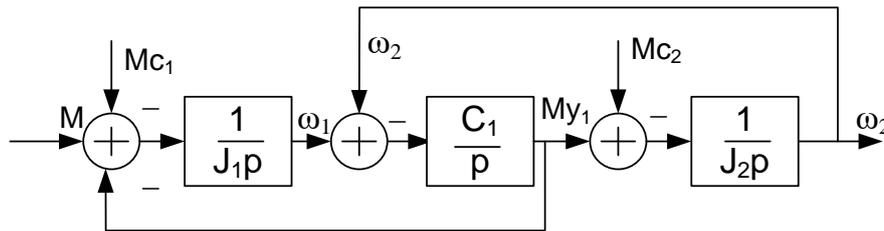


Рис. 13 Двухмассовая механическая система: управляющее воздействие – электромагнитный момент  $M$  двигателя; возмущающее воздействие – моменты сопротивления  $M_{c1}$ ;  $M_{c2}$ ; регулируемые переменные:  $\omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2, M_{y1}, M_{y2}$ .

$$W_{\omega_1}(p) = \frac{\omega_1(p)}{M(p)} = \frac{p^2 + \frac{J_1}{J_1 + J_2} \omega_0^2}{J_1 p (p^2 + \omega_0^2)};$$

где,  $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_1(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}}$  - частота собственных колебаний двухмассовой упругой системы.

$$W_{\omega_2}(p) = \frac{\omega_2(p)}{M(p)} = \frac{\omega_0^2}{p(J_1 + J_2)(p^2 + \omega_0^2)};$$

$$W_{M_{y1}}(p) = \frac{M_{y1}(p)}{M(p)} = \frac{\frac{J_2}{J_1 + J_2} \omega_0^2}{p^2 + \omega_0^2}.$$

Характеристическое уравнение системы определяется, например, из  $W_{M_{y1}}(p)$  как

$$p^2 + \omega_0^2 = 0.$$

Корни уравнения  $p_{1,2} = \pm i\omega_0$

Таким образом, при отсутствии в МС сил, зависящих от скорости, двухмассовая упругая МС представляет собой консервативное звено (идеальное колебательное звено):

$$W_{конс}(p) = \frac{1}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} \Big|_{\xi=0} = \frac{1}{T^2 p^2 + 1}.$$

Момент, возникающий в упругом элементе, состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое – это момент, возникающий при деформации упругого элемента:  $M_{y12} = C_{12}(\varphi_1 - \varphi_2)$ ; второе слагаемое связано с вязким трением, момент которого в упругих элементах пропорционален разности скоростей:

$$My_{12}'' = b_{12} \left( \frac{d\varphi_1}{dt} - \frac{d\varphi_2}{dt} \right) = b_{12} (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2).$$

Тогда, суммарный момент упругих деформаций:

$$My_{12} = My_{12}' + My_{12}'' = c_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) = b_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2).$$

В операторной форме:

$$My_{12}(p) = c_{12}[\varphi_1(p) - \varphi_2(p)] + b_{12}p[\varphi_1(p) - \varphi_2(p)] = (c_{12} + b_{12}p)[\varphi_1(p) - \varphi_2(p)].$$

Структурная схема может быть представлена в виде:

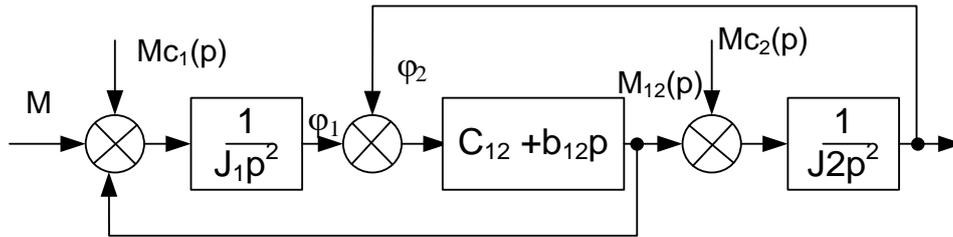


Рис. 14. Двухмассовая механическая система: управляющее воздействие – электромагнитный момент  $M$  двигателя; возмущающее воздействие – моменты сопротивления  $M_{c1}$ ;  $M_{c2}$ ; регулируемые переменные:  $\varphi_1, \varphi_2, My_1, My_2$ .

В этом случае

$$Z(p) = \frac{M(p)}{\omega(p)} - \text{механическое сопротивление};$$

$$Y(p) = \frac{\omega(p)}{M(p)} - \text{механическая проводимость}.$$

Для вращающейся массы с моментом инерции  $J$  и имеющей потери на трение:

$$Z(p) = Jp + b.$$

Для упругого элемента расположенного между 1 и 2 массами:

$$Z_{12}(p) = \frac{C_{12}}{p} + b_{12}.$$

Заменой  $p = j\omega$  можно получить комплексное значение механического сопротивления:

$$Z(j\omega) = b + jJ\omega;$$

$$Z_{12}(j\omega) = b_{12} - j\frac{C_{12}}{\omega}.$$

### Потери в механических передачах

Мощность сил сопротивления на валу двигателя  $P_{дв}$  оказывается больше на величину потерь на трение в пределах:

$$P_{дв} = M_{np}\omega + \Delta P_{тр}$$

Если известен КПД, то потери на трение могут быть учтены путем увеличения приведенного момента:

$$M_{np} = M_c / i\eta - \text{круговое}$$

$$M_{np} = F\rho / \eta - \text{линейное}$$

Это хорошо в случае расчета статических характеристик. В динамических расчетах характеристики потерь удобно выделять в виде момента трения и привести его к валу двигателя.

Если известна мощность  $P = M_c\omega_1$ , передаваемая через МС, то потери мощности на трение:

$$\Delta P_{mp} = (1 - \eta)M_c\omega_1/\eta$$

и приведенный к валу двигателя момент трения

$$M_{mp} = (1 - \eta) \frac{M_c}{i\eta}$$

Аналогично для поступательного движения

$$M_{mp} = (1 - \eta) \frac{F_c\rho}{\eta}$$

КПД механической передачи меняется при изменении скорости. При расчетах динамики важен не сам момент трения, а коэффициент, характеризующий его зависимость от скорости:

$$\rho_{ном} = \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}} \frac{M_{сном}}{i\omega_{ном}};$$
$$\beta_{ном} = \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}} \frac{F_{сном}V_{ном}}{\omega_{ном}^2}$$

#### 4. СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Независимо от темы и типа МС курсовой проект должен состоять из пояснительной записки и графической части. В пояснительной записке необходимо последовательно расположить следующий материал:

- титульный лист;
- аннотация;
- бланк задания на проектирование;
- введение;
- техническое задание на проектирование;
- описание проектируемой МС;
- разработка конструкции и расчет МС и основных компоновочных решений;

- расчет и выбор электропривода;
- расчет и выбор системы управления;
- расчет и выбор преобразователей (датчиков) измерительной информации;
- разработка принципиальной электрической схемы интерфейса и ее описание
- моделирование процессов в МС и их частях;
- заключение;
- литература;
- содержание.

На чертежах проекта должны быть представлены следующие графические материалы:

- кинематическая схема.
- чертеж общего вида проектируемой МС или сборочный чертеж;
- структурная схема устройства, включающая в себя систему управления, электропривод, измерительные устройства и механизм проектируемого изделия;
- схема структурная общего алгоритма управления проектируемым изделием;
- принципиальная электрическая схема проектируемого изделия (по согласованию с руководителем курсового проекта);
- модель системы и результаты моделирования.

Курсовой проект состоит из пояснительной записки объемом 30...40 листов формата А4, включая таблицы и приложения, и графической части на 5 листах формата А1.

***Оформленный проект должен содержать диск с текстом работы, чертежи и презентацию.***

#### **4.1. Задание на курсовой проект**

Курсовой проект в основном ориентирован на разработку мехатронных систем, имеющих несколько механизмов, движения или функционирование которых взаимосвязаны и взаимообусловлены. Ввиду ограниченности времени на выполнение проекта объект автоматизации не должен быть сложным. Желательно, чтобы это был автономно работающий объект без сложных связей с соседними объектами. Примерная тематика курсовых проектов указана в заданиях к курсовому проекту. Предпочтительным для студентов является выбор МС во время производственной практики. Знакомство с МС и сбор

исходных данных в течение практики способствует более осмысленному и качественному выполнению проекта.

Если же такой возможности нет, то студентам выдаются варианты заданий на курсовой проект.

Успешное выполнение курсового проекта во многом зависит от степени изученности проектируемой системы и полноты собранного материала. Для успешного начала проектирования студенты в течение производственной практики должны собрать материалы по следующим вопросам:

- назначение, конструктивная и технологическая связь комплекса механизмов, подлежащих проектированию;
- конструкция, кинематическая схема и принцип действия МС, мощности приводных электродвигателей, принципиальные схемы электроприводов, план размещения оборудования, включая преобразователи технологической информации, размещение пультов управления с указанием основных аппаратов управления, контрольно-измерительных и сигнальных приборов;
- существующие основные технические решения, использованные на объекте.

Указанные материалы собираются на основе изучения принципиальных схем, схем соединений, чертежей конструкций панелей и пультов, технологических инструкций, отчетов по наладке электрооборудования, отчетов по исследовательским работам, проектных материалов и т. д.

Те студенты, которым выданы варианты заданий на курсовое проектирование, перечисленные выше вопросы выясняют по литературным источникам по заданным или аналогичным механизмам.

## 4.2. Варианты заданий

Упрощенные кинематические схемы модулей

а) Привод продольного перемещения суппорта



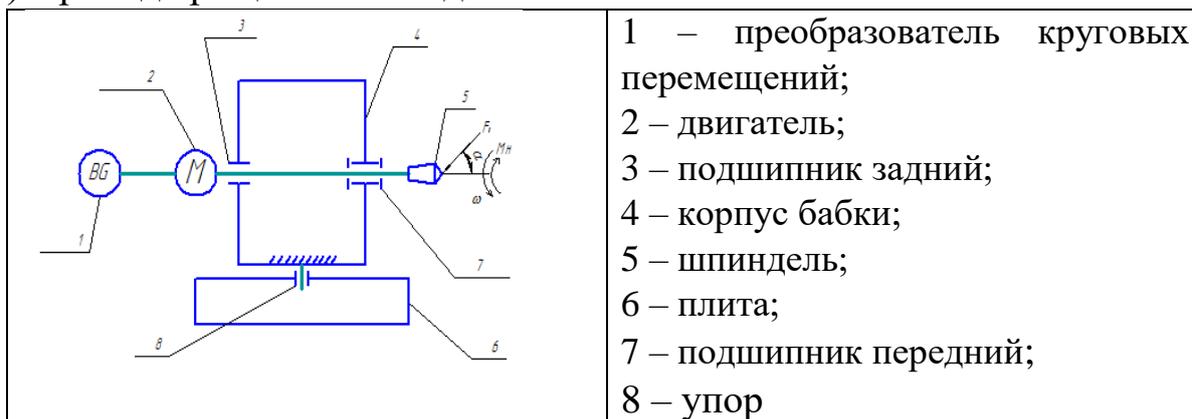
Вращение вала двигателя 1 через муфту 3 передается на шариковинтовую передачу 5, закрепленной в опорах 9. Суппорт 6 совершает передвижение на направляющих 7, ограниченное конечными выключателями 10, вдоль станины 4.

б) Привод поступательного перемещения стола станка



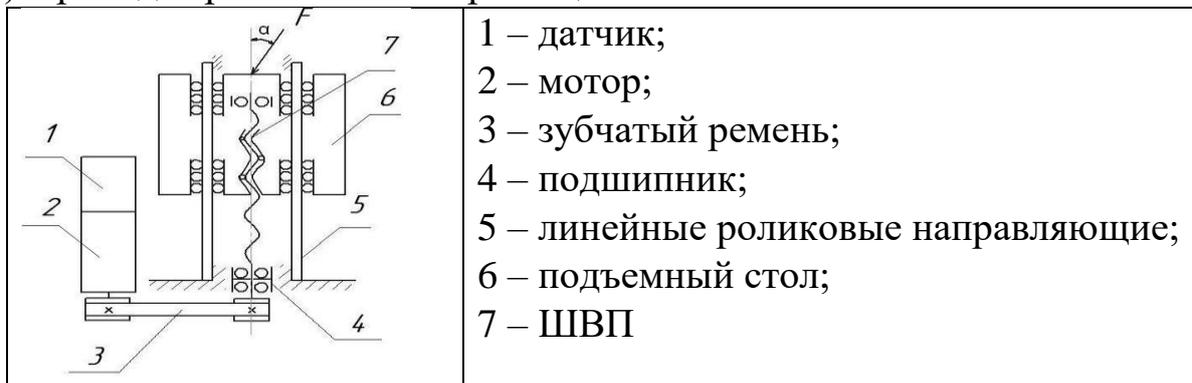
Двигатель 1 вращает вал ременной передачи 2, которая вращает вал шариковой пары 5, что позволяет столу 3 перемещаться.

в) Привод вращения шпинделя



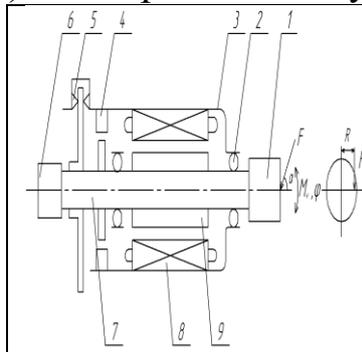
От двигателя 2 вращающий момент передается на шпиндель 5. В корпусе бабки 4 имеются два подшипника: передний 7 и задний 3, являющиеся опорой для шпинделя. Корпус закреплен на плите 6 при помощи упора 8. Контроль движения обеспечивается преобразователем движения 1.

г) Привод вертикального перемещения стола станка



Вращение с двигателя 2 через зубчатый ремень 3 передается на ШВП 7, которая перемещает стол 6.

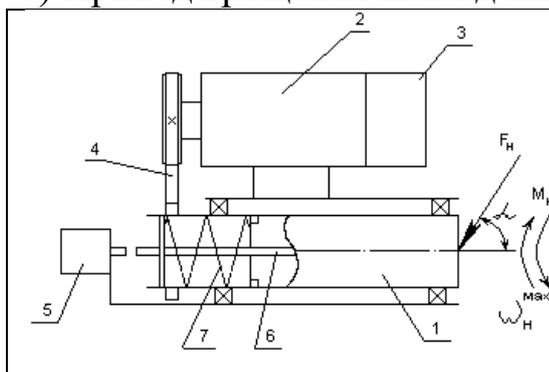
д) Мехатронный модуль со встроенным электродвигателем



- 1 – рабочий орган;
- 2 – подшипник;
- 3 – корпус;
- 4 – датчик перемещения;
- 5 – дисковый тормоз;
- 6 – привод зажима;
- 7 – вал; 8 – статор; 9 – ротор

На валу 7 закреплен ротор 9, на котором установлен рабочий орган 1. Статор 8 встроен в корпус 3. Опорами вала служат подшипники 2; для фиксации положения служит дисковый тормоз 5. Для определения положения вала служит датчик перемещения 4.

е) Привод вращения шпинделя 2



- 1 – шпиндель;
- 2 – двигатель;
- 3 – датчик угла поворота;
- 4 – ременная передача;
- 5 – пневмоцилиндр;
- 6 – толкатель;
- 7 – пружина.

От двигателя 2 вращающий момент передается через ременную передачу 4 на шпиндель 1. Перемещения толкателя 6 для смены инструментов осуществляется с двух сторон пневмоцилиндром 5 и пружиной 7.

### 4.3. Исходные данные к вариантам заданий

Режим движения рабочего органа мехатронного модуля в общем случае включает этапы разгона, движения с установившейся скоростью, торможения и выстоя (отсутствия движения). Характер типового движения модуля металлорежущего станка, как правило, содержит все указанные режимы (режим установившегося движения может отсутствовать). Графическая зависимость скорости движения от времени называется тахограммой движения. При постоянстве ускорения, разгона и торможения она имеет трапецеидальный или треугольный вид.

На рис. 1 представлена типовая трапецеидальная тахограмма движения мехатронного модуля, содержащая все указанные выше режимы движения.

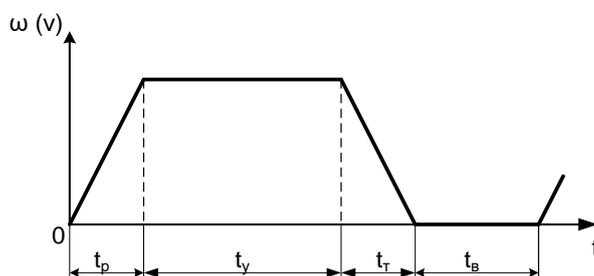


Рис. 1. Типовая тахограмма движения мехатронного модуля:  $t_p$  – время разгона;  $t_y$  – установившееся время;  $t_r$  – время торможения;  $t_b$  – время выстоя

В таблицах 1 и 2 приведены исходные данные для выполнения курсового проекта в соответствии с рисунками 1 и 2, разделенные по видам движения рабочего органа.

Таблица 4.1

Поступательное движение рабочего органа (схемы 1 а), б), г))

№ п/п	Наименование параметра	Варианты задания					
		1	2	3	4	5	6
1	Максимальная величина перемещения $S$ , м	0.28	0.32	0.4	0.63	0.8	1.06
2	Наибольшая скорость перемещения $V$ , м/с	0.25	0.3	0.5	0.5	0.4	0.25
3	Действующее усилие нагрузки $F$ , Н	8000	2500	2000	4000	5000	3000
4	Угол действия нагрузки $\alpha$ , рад	0.2	0.3	0.15	0.3	0.2	0.25
5	Момент нагрузки $M$ , Н·м	30	20	40	50	70	20
6	Максимальная перемещаемая масса $m$ , кг	200	350	500	300	250	300
7	Дискретность задания величины перемещения $D$ , мкм	0.1	0.3	0.5	0.1	0.8	1
8	Точность двустороннего позиционирования $\Delta_1$ , мкм	1	3	5	7	8	10
9	Точность одностороннего позиционирования $\Delta_2$ , мкм	0.5	2	3	5	6	7
10	Время разгона $t_p$ , с	0.06	0.09	0.08	0.06	0.07	0.1
11	Время установившегося движения $t_y$ , с	0	0	1.1	1	1.2	1.5
12	Время торможения $t_r$ , с	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09
13	Время выстоя $t_b$ , с	5	7	8	6	3	10

Комментарии к таблицам 1 и 2:

1 При получении задания исходные данные следует уточнить у преподавателя.

2 Точность двустороннего позиционирования определяется средней величиной погрешности при многократном перемещении рабочего органа в заданную точку с двух сторон.

3 Точность одностороннего позиционирования определяется средней величиной погрешности при многократном перемещении рабочего органа в заданную точку с одной стороны.

4 Дискретность задания величины перемещения – дискретность формирования сигнала управления на исполнительный привод определенного в координатах перемещения.

5 Максимальная скорость движения имеет место при максимальной нагрузке.

6

Таблица 4.2 Вращательное движение рабочего органа  
(схемы 1 в), д), е)

№ п/п	Наименование параметра	Варианты задания					
		1	2	3	4	5	6
1	Максимальная величина перемещения $\varphi$ , рад	Не ограничена					
2	Наибольшая частота вращения рабочего органа $\omega$ , об/мин	1000	2000	4500	3000	5000	1500
3	Действующее усилие нагрузки $F$ , Н	8000	2500	2000	4000	5000	3000
4	Угол действия нагрузки $\alpha$ , рад	0.2	0.3	0.15	0.3	0.2	0.25
5	Момент нагрузки $M$ , Н·м	30	20	40	50	70	20
6	Ориентировочный момент инерции нагрузки $J$ , кг·м <sup>2</sup>	0.7	0.4	0.1	0.15	0.1	0.6
7	Дискретность задания величины перемещения $D$ , угл.с	1	1	2	4	4	5
8	Точность двустороннего позиционирования $\Delta_1$ , угл.с	2	3	5	7	8	10
9	Точность одностороннего позиционирования $\Delta_2$ , угл.с	0.5	2	3	5	6	7
10	Время разгона $t_p$ , с	0.06	0.09	0.08	0.06	0.07	0.1
11	Время установившегося движения $t_y$ , с	0	0	1.1	1	1.2	1.5
12	Время торможения $t_t$ , с	0.07	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09
13	Время выстоят <sub>в</sub> , с	5	7	8	6	3	10

#### **4.4. Разработка технического задания на проектирование**

В разрабатываемом проекте необходимо составить техническое задание, отвечающее потребности машиностроительного предприятия, указав в нем все условия эксплуатации и параметров изделия. При составлении ТЗ необходимо руководствоваться действующими стандартами, ГОСТ(ами) , техническими регламентами и т.п. В качестве базовых параметров берутся данные из задания. При разработке ТЗ, в зависимости от условий эксплуатации, технологических операций и т.п. можно использовать только основные параметры и характеристики, опуская второстепенные или малоинформативные.

Схема состава технического задания (ТЗ) на проектирование МС.

1. Наименование МС и область применения.

В этом разделе ТЗ дается краткая характеристика области применения МС и в том числе:

1.1. Характеристика среды использования изделия (вид и тип производства, назначение производства, характеристики оборудования окружающей среды, условия применения в быту и т. п.).

1.2. Организационная структура среды использования изделия (режим работы по времени, организация обслуживания и т. п.).

1.3. Геометрические и компоновочные характеристики среды использования (компоновочное пространство, способ размещения и монтажа изделия и т. п.).

1.4. Характеристика организации управления изделием (автоматическое, автоматизированное, способ программирования, способ адаптации и ее характеристики).

1.5. Описание нагрузки выходного механического звена МС.

1.5.1. Геометрические характеристики нагрузки (конфигурация, размеры, масса, материал, физико-химические свойства и т. п.).

1.5.2. Характеристики всех внешних сил, действующих на выходное звено, как активных, так и реактивных.

1.6. Показатели, связанные с внешними функциями выходного звена (характер движения, позиционирования и ориентации, особенности технологических и других процессов, выполняемых выходным звеном в среде использования).

- 1.7. Условия эксплуатации изделия (параметры среды (температура, влажность, давление, загазованность, загрязненность, наличие агрессивных факторов), наличие ударов и вибраций и их параметры).
2. Назначение изделия. В этом разделе формируют все функции изделия по отношению к среде использования, оперативному персоналу и внешним системам, взаимодействующим с изделием.
  - 2.1. Вид операций, выполняемых изделием в среде использования.
  - 2.2. Степень специализации изделия.
  - 2.3. Содержание двигательных функций выходного звена изделия.
  - 2.4. Описание функций контроля и управления со стороны изделия по отношению к внешним устройствам.
  - 2.5. Управление мехатронным устройством.
    - 2.5.1. Автоматическое.
      - 2.5.1.1. Способ формирования управлений.
        - 2.5.1.1.1. Формирование управляющих программ (УП) во внешних системах и периодическое их обновление в памяти устройств управления. Последовательность запуска УП определяется общей программой функционирования или командами внешней системы.
        - 2.5.1.1.2. Формирование УП из стандартных подпрограмм, хранящихся в библиотеке УУ, по командам внешних систем.
        - 2.5.1.1.3. Формирование цели управления внешней системой (программа управления формируется УУ).
      - 2.5.1.2. Способ коррекции УП.
        - 2.5.1.2.1. Без коррекции, жестко программируемые.
        - 2.5.1.2.2. Адаптивные УП, корректируемые по сигналам информационных систем.
        - 2.5.1.2.3. УП, корректируемые сигналами внешних систем.
      - 2.5.1.3. Функции обратной связи с внешней системой.
        - 2.5.1.3.1. Без обратной связи.
        - 2.5.1.3.2. Ограниченная информация во внешнюю систему (сигнал об отработке УП, сигнал об аварийном останове, сигнал об отработке останова по команде внешней системы).
        - 2.5.1.3.3. Полная информация внешней системы по всем контролируемым параметрам.

- 2.5.1.3.4. Интегральная (обобщенная) информация во внешние системы.
- 2.5.2. Автоматизированное.
  - 2.5.2.1. Способ формирования управления.
    - 2.5.2.1.1. Интерактивный режим.
    - 2.5.2.1.2. Непосредственное программирование обучением.
    - 2.5.2.1.3. Непосредственное программирование УП.
    - 2.5.2.1.4. Ручной ввод предварительно сформированных УП.
    - 2.5.2.1.5. Аналитическое программирование.
    - 2.5.2.1.6. Контроль оператором автоматически введенных УП и их санкционированный запуск.
  - 2.5.2.2. Способ коррекции УП.
    - 2.5.2.2.1. Аналогично 2.5.1.2.1 -2.5.1.2.3.
    - 2.5.2.2.2. Коррекция оператором.
  - 2.5.2.3. Функции обратной связи с внешними системами.
    - 2.5.2.3.1. Аналогично 2.5.1.3.2 -2.5.1.3.4.
    - 2.5.2.3.2. Сигнализация нарушений оператору.
    - 2.5.2.3.3. Диалоговый режим с оператором.
- 2.5.3. Ручное.
  - 2.5.3.1. Способ формирования управления.
    - 2.5.3.1.1. Формирование цели управления.
    - 2.5.3.1.2. Позиционное управление.
    - 2.5.3.1.3. Управление по вектору силы.
    - 2.5.3.1.4. Управление по вектору скорости.
    - 2.5.3.1.5. Управление копирующее.
    - 2.5.3.1.6. Управление с очувствлением (по усилию, по наличию контакта и т. п.).
  - 2.5.3.2. Функции обратной связи с оператором.
    - 2.5.3.2.1. Визуальный контроль.
    - 2.5.3.2.2. Отображение сцен.
    - 2.5.3.2.3. Отражение усилий.
    - 2.5.3.2.4. Отражение факта касания.
    - 2.5.3.2.5. Отображение информации на показывающих устройствах.
      - 2.5.3.2.5.1. В символьной форме (дисплей, табло).

2.5.3.2.5.2. В аналоговой форме (стрелочные приборы, осциллографы и т. п.).

2.5.3.2.6. Сигнализация (световая, звуковая).

2.6. Описание функций устройства управления по автоматизации учета, диагностике нарушений, планированию подведения МС.

2.7. Функции внешней информационной системы.

2.7.1. Восприятие внешней среды.

2.7.1.1. Поиск объекта по установленным признакам.

2.7.1.2. Распознавание формы и ориентации заданного предмета.

2.7.1.3. Контроль факта контакта с внешним миром.

2.7.1.4. Определение физических параметров внешнего мира (прозрачность, магнитные свойства, температура, масса, габариты, твердость и т. п.).

2.7.1.5. Контроль выполнения функций мехатронного устройства.

2.7.2. Считывание маркировок.

2.7.3. Контроль состояния мехатронного устройства внешними средствами.

2.7.4. Самообучение мехатронного устройства.

2.7.5. Аварийно-блокировочные функции.

2.8. Прочие функции.

3. Основные технические требования к мехатронному устройству.

3.1. Характеристика требуемых рабочих объемов (геометрическая характеристика рабочего пространства с размещением и геометрическими характеристиками предметной обстановки в рабочем пространстве и на границах, базовая система координат, геометрическая характеристика рабочей зоны, геометрическая характеристика зоны обслуживания и манипулятивности).

3.2. Требования к качеству траекторий движения выходного механического звена (ВМЗ) (конфигурация, длина (м), значения скоростей перемещений (м/с), значения ускорений перемещений (м/с<sup>2</sup>), ориентация вдоль траекторий (м, град), значение скоростей ориентации (м/с, град/с), значение ускорений ориентации (м/с, град/с).

3.3. Номинальная нагрузка на ВМЗ.

3.4. Максимальная абсолютная погрешность позиционирования (мм), максимальная абсолютная погрешность отработки траектории в уста-

новленных точках (мм), максимальная абсолютная погрешность ориентации (град) в установленных точках, характер переходного процесса при позиционировании или выходе на отслеживаемую траекторию.

3.5. Эксплуатационные показатели рабочего органа ВМЗ: масса (кг) и габариты (мм), тип рабочего органа, энергопитание, способ подачи рабочего тела (краска, инертный газ, воздух, песок и т. п.), тип датчиков на рабочем органе, характеристики каналов связи датчиков с устройством управления и т. п., номенклатура захватных устройств (ЗУ) по ГОСТ 26063-83 и далее по каждому ЗУ: масса (кг), максимальный и минимальный характерный размер (мм) захватываемого предмета, время (с) захватывания и отпускания, усилие захватывания и удержания (Н), характеристика каналов подачи энергии к ЗУ и от ЗУ, характеристики привода ЗУ и датчиков ЗУ, способ крепления несменных ЗУ, способ смены (вручную (фланцевые соединения по ГОСТ 26063-83) или автоматически (цанговое или байонетное соединение)), конструкция и присоединительные размеры мест крепления ЗУ, число и конструкция разъемов (электрических, пневматических), способ контроля факта смены ЗУ.

3.6. Показатели энергопитания: род тока, напряжение питания (В), установленная мощность (ВА), давление (МПа) и расход (м<sup>3</sup>/с) рабочего тела (по ГОСТ 17108-79 для гидроприводов, по ГОСТ 19862-74 для пневмоприводов).

3.7. Показатели устройства управления.

3.7.1. Вид управления.

3.7.1.1. Программное управление.

3.7.1.1.1. Цикловое.

3.7.1.1.1.1. Программируемые командоаппараты.

3.7.1.1.1.2. С релейно-контактными схемами.

3.7.1.1.1.3. С жесткой последовательностью операций.

3.7.1.1.2. Позиционное.

3.7.1.1.2.1. С разомкнутым шаговым приводом.

3.7.1.1.2.2. Со следящим приводом.

3.7.1.1.3. Контурное с отслеживанием установленных параметров (траектория, скорость, ускорение, ориентация, усилие и т. п.).

- 3.7.1.2. Адаптивное управление.
  - 3.7.1.2.1. Позиционное.
  - 3.7.1.2.2. Контурное.
- 3.7.2. Способ формирования УП.
  - 3.7.2.1. Обучение.
    - 3.7.2.1.1. Посредством пульта обучения.
      - 3.7.2.1.2. Формированием траектории движения рабочего органа вручную.
      - 3.7.2.1.3. Предварительным набором команд и позиций.
    - 3.7.2.2. Аналитическое программирование.
      - 3.7.2.2.1. На языке программирования инструментальном.
      - 3.7.2.2.2. На языке программирования МС.
  - 3.7.3. Требования к технической реализации МС.
    - 3.7.3.1. Максимальный объем УП по занимаемой памяти.
    - 3.7.3.2. Количество УП, одновременно хранящихся в памяти МС, и объем памяти, занимаемой каждой УП.
    - 3.7.3.3. Способ вывода (на панель, на дисплей, на печать, на табло и т. п.) регламентированной информации персоналу и состав этой информации.
    - 3.7.3.4. Способ ввода дополнительной информации со стороны оперативного персонала и состав этой информации.
    - 3.7.3.5. Компоновка УУ.
    - 3.7.3.6. Требование резервирования и дублирования памяти на внешних носителях.
    - 3.7.3.7. Ограничения на потребляемую мощность.
  - 3.7.4. Требования к системе связей.
    - 3.7.4.1. Состав интерфейсов.
    - 3.7.4.2. Требования к интерфейсам.
      - 3.7.4.2.1. Управляющим в части выдачи управляющих сигналов, линиям связи с внешними системами, технологическим, аварийно-блокировочным, энергетическим, в части питания датчиков сигналов и автоматики управления и аварийно-блокировочной автоматики.
        - 3.7.4.2.1.1. Вид сигнала (аналоговый, позиционный, числоимпульсный).

- 3.7.4.2.1.2. Тип физического носителя сигнала (электрический ток, воздух, жидкость и т. п.).
- 3.7.4.2.1.3. Параметры физического носителя (уровень напряжения и мощности электрического тока, давление и расход рабочего тела и т. п.).
- 3.7.4.2.1.4. Допустимая величина колебаний параметров физического носителя.
- 3.7.5. Размещение пульта управления.
  - 3.7.5.1. Автономное, вынесенное из конструктива МС.
  - 3.7.5.2. Встроенное в конструктив МС. -
  - 3.7.5.3. Встроенное в корпус мехатронного устройства.
- 3.7.6. Размещение пульта обучения.
  - 3.7.6.1. Встроенное в пульт управления.
  - 3.7.6.2. Автономное (указывается длина интерфейса).
- 3.7.7. Размещение средств отображения информации оператору.
  - 3.7.7.1. Встроенное в пульт управления.
  - 3.7.7.2. Встроенное в пульт обучения.
  - 3.7.7.3. Автономное.
  - 3.7.7.4. На корпусе мехатронного устройства.
- 3.8. Требования к внешней информационной системе (ИС).
  - 3.8.1. Требования к составу информации (вид сигнала, объем информации и т. п.).
  - 3.8.2. Требования к физическому носителю информации (тип носителя, параметры, допустимые колебания параметров и т. п.).
  - 3.8.3. Требования по точности информации.
  - 3.8.4. Требования к помехозащищенности информации.
  - 3.8.5. Требования по энергопитанию ИС.
  - 3.8.6. Требования по массе и габаритам.
  - 3.8.7. Требования по месту размещения, условиям монтажа, обслуживания и ремонта.
  - 3.8.8. Требования к сопряжениям с интерфейсами.
  - 3.8.9. Требования к условиям внешней среды (освещенность, отсутствие металлической пыли, работа в условиях нестабильности энергопитания, работа в условиях вибраций и т. п.).
  - 3.8.10. Требования к разрешающей способности (чувствительности).

- 3.8.11. Требования по влиянию на внешнюю среду (недопустимость лазерной подсветки, ультразвукового воздействия в установленных направлениях, радиоактивного фона и т. п.).
- 3.9 Требования эргономики по ГОСТ 12.2.009-80, ГОСТ 12.2.049-80, ГОСТ 9146-79.
- 3.10. Требования безопасности (ГОСТ 12.2.072-82, данные о степени защиты по ГОСТ 14254-80 и ГОСТ 14255-69).
- 3.10.1. Требования безопасности к гидрооборудованию по ГОСТ 12.2.040-79, к пневмооборудованию по ГОСТ 12.3.001-73, к электрооборудованию по ГОСТ 12.2.007-75, ГОСТ 12.1.019-79 и по правилам устройства электроустановок.
- 3.10.2. Требования к шумовым характеристикам по ГОСТ 12.1.003-76.
- 3.10.3 Уровни допустимых вибраций по ГОСТ 12.1.012-78.
- 3.10.4. Уровень помех в соответствии с нормами допустимых промышленных помех.
- 3.10.5. Сигнальные цвета и знаки безопасности по ГОСТ 12.4.026-76.
- 3.10.6. Требования к расположению органов управления и средствам отображения информации по ГОСТ 23000-78.
- 3.10.7. Требования к звуковым сигналам по ГОСТ 21758-76.
- 3.10.8. Требования к световым сигналам по ГОСТ 12.4.026-76.
- 3.10.9. Надписи и символы по ГОСТ 12.4.040-78.
- 3.11. Требования к надежности по ГОСТ 13216-74 и ГОСТ 20699-75.
- 3.11.1. Общие (установленная безотказная наработка, наработка на сбой, установленный срок службы).
- 3.11.2. Специальные (устанавливаются заказчиком).
- 3.12. Требования по устойчивости к внешним воздействиям.
- 3.12.1. По устойчивости к климатическим воздействиям окружающей среды в соответствии с ГОСТ 12997-76.
- 3.12.2. По устойчивости к механическим воздействиям в обычном и виброустойчивом исполнении в соответствии с ГОСТ 17167-71.
- 3.12.3. По пылезащищенности в соответствии с ГОСТ 17785-72.
- 3.12.4. По защищенности от воды в соответствии с ГОСТ 17786-72.
- 3.12.5. По защите от сетевых помех в соответствии с ГОСТ 21021-80.
- 3.13. Специальные требования.

3.14. Особые требования заказчика (требования соответствия нормам заказчика, требование использования комплектующих заказчика и т. п.).

4. Техничко-экономические показатели.

4.1. Годовой экономический эффект.

4.2. Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений.

4.3. Предельно допустимые затраты на проектирование и создание меха-тронного устройства.

4.4. Ожидаемая прибыль.

5. Порядок испытаний, контроля и приемки изделия.

5.1. Функции, подлежащие испытаниям.

5.1.1. Способность к переналадке (перепрограммированию), величина и точность перемещений, точность позиционирования, скорость перемещений, время переходов.

5.1.2. Способность к взаимодействию с внешней средой.

5.1.3. Особенности динамики.

5.1.4. Способность к эксплуатации в данных условиях.

5.1.5. Соответствие требованиям техники безопасности.

5.2. Виды испытаний по ГОСТ 16504-81 (доводочные, приемосдаточные, исследовательские, предварительные, приемочные, аттестационные, периодические, типовые).

5.3. Требования к условиям проведения испытаний.

5.3.1. Испытания должны проходить в условиях нормальной эксплуатации при значениях факторов внешней среды по ГОСТ 5150-69.

5.3.2. Порядок проведения испытаний.

5.4. Требования к испытываемым образцам и их количество.

5.5. Требования по подготовке образца к испытаниям (установка в помещении с нормальными условиями, установка в соответствии с требованиями инструкции по эксплуатации, обеспечение требований техники безопасности испытаний и требований к квалификации персонала, проводящего испытания).

5.6. Требования к средствам измерений (средства измерения должны быть аттестованы и иметь соответствующий паспорт, средства измерения точности должны соответствовать ГОСТ 8-77).

5.7. Оформление результатов испытаний.

- 5.7.1. Приемочные испытания оформляют актом и протоколом.
- 5.7.2. Исследовательские испытания оформляют в виде отчета.
- 5.7.3. Аттестационные испытания оформляют по формам, установленным заказчиком или по форме, установленной разработчиком и согласованной с заказчиком.
- 5.7.4. Периодические испытания по ГОСТ 15.001-73.
- 5.7.5. Типовые испытания оформляют протоколом, утверждаемым руководством предприятия-изготовителя.
- 6. Календарный план проектирования (план-график, сетевой график).
- 7. Обязанности сторон.
- 8. Прочие сведения.

#### **4.5. Описание конструкции и функционирования мехатронной системы**

Описание функционирования МС необходимо для четкого определения места и назначения проектируемой системы. В описании должно быть кратко изложено, какая информация поступает на вход системы управления МС.

В описании следует дать упрощенную схему размещения исполнительных механизмов, приводов и датчиков. На этой схеме каждому упоминающемуся в тексте элементу присваивается позиционное обозначение, на которое в тексте дается ссылка.

Для проектируемого объекта необходимо дать описание конструкции и кинематики механизмов. Описание должно иллюстрироваться необходимыми схемами, временными диаграммами и т. п. Далее должна быть представлена последовательность работы механизмов объекта, связь между ними, взаимообусловленность и согласование их движений и функционирования.

Если тема проекта не связана с местом практики, данный раздел содержит описание функционирования МС в соответствии с выданным вариантом задания, дополненное сведениями из литературы.

Описание заканчивается требованиями, предъявляемыми к системе управления, в удовлетворении которых и заключается разработка проекта. Следует отразить:

- степень автоматизации объекта, т. е. к чему будут сводиться функции оператора по управлению проектируемой системой;
- какую необходимо предусмотреть индикацию и сигнализацию для контроля за ходом работы МС;
- требования к ручному и наладочному режимам работы системы (при наличии таковых);
- необходимость узлов встроенного контроля функционирования системы в автоматическом режиме и к чему должен сводиться этот контроль;
- меры безопасности при работе объекта.

#### **4.6. Разработка алгоритма работы мехатронной системы**

Алгоритм работы проектируемой системы автоматизации составляется на основе описания технологического процесса, последовательности работы механизмов объекта и требований к системе управления. Алгоритм может представляться различными способами в зависимости от особенностей объекта и той элементной базы, на которой будет реализована система управления. Это может быть схема алгоритма, логические уравнения (Булевы функции) или текстовое описание причинно-следственных связей в работе системы при формировании выходных сигналов и команд.

В любом случае, приступая к разработке алгоритма работы, необходимо определить следующее:

- а) в каких режимах будет функционировать система управления объекта (автоматический, наладочный, ручной, тестового контроля и т. п.);
- б) команды, поступающие с пульта управления в систему управления и на исполнительные устройства;
- в) сигналы с преобразователей измерительной информации, на пульт управления и на исполнительные устройства;
- г) сигналы связи с оборудованием соседних систем и механизмов (если таковые имеются) и сигналы с более высокого этажа иерархии управления;

д) выходные команды и сигналы, вырабатываемые системой управления.

Автоматические устройства работают обычно в двух режимах: автоматическом и наладочном. В автоматическом режиме все механизмы работают в последовательности, заданной циклограммой работы, без вмешательства оператора. Частным случаем автоматического режима является полуавтоматический, когда переход на новый цикл подтверждается кнопочной командой.

В наладочном режиме все механизмы работают независимо с соблюдением необходимых блокировок. Управление движением осуществляется от кнопок управления. Наладочный режим является вспомогательным, а основным режимом является автоматический. Наладочный режим необходим для перемещения механизмов в контрольные позиции для уточнения моментов срабатывания датчиков, изменения положений рабочих органов при выполнении ремонтных работ и устранении последствий аварийных ситуаций и т. п.

Вместо наладочного режима может быть предусмотрен ручной режим работы. Его отличие от наладочного режима заключается в том, что предусматривается возможность управления оператором вручную при выходе системы управления из строя. Тогда на пульте управления должна быть установлена соответствующая командная и сигнальная аппаратура, которая для наладочного режима в таком объеме может не устанавливаться. Ручной режим работы является альтернативным автоматическому режиму. Он должен предусматривать возможность выполнения всех действий, которые имеют место в автоматическом режиме работы и даже больше, так как ручной режим должен обеспечивать перемещение также при ремонтных работах и устранении аварийных ситуаций.

Режим контроля обеспечивает проверку функционирования системы управления после ремонтных и наладочных работ. Введение этого режима необходимо тогда, когда при автоматической работе предметы производства (деталь, заготовка, готовая продукция и т. п.) воздействуют на датчики, сигналы с которых поступают в систему управления. Если же предмета производства нет, а нужно проверить работоспособность системы управления, то упомянутые сигналы с

датчиков нужно имитировать. Сигналы имитации можно формировать в функции времени или каким-либо иным способом.

В этом режиме желательно проверить работоспособность всех механизмов, системы управления и возможно большей части датчиковой аппаратуры. При этом возможно воспроизводить лишь часть автоматического цикла работы системы.

На этапе разработки алгоритма работы системы управления необходимо принять решение, на какой элементной базе будет реализована система автоматизации. Так, например, программируемые контроллеры комплекса МикроДАТ позволяют осуществлять программирование на основе схемы алгоритма управления. Тогда проектировщик занимается не синтезом логических уравнений, а структурированием программы. Он определяет, сколько сегментов будет иметь программа управления, сколько будет содержаться в каждом сегменте блоков и что будет делаться в каждом блоке программы. Тогда алгоритм автоматизации будет представляться схемами алгоритмов для каждого сегмента программы. Схема алгоритмов сопровождается описанием, поясняющим назначение каждого оператора схемы алгоритма.

Для большинства же программируемых контроллеров программирование ведется на языке уравнений алгебры логики (алгебры Буля) или на языке релейно-контактных символов (РКС). Но построить релейно-контактную схему наиболее быстро и с минимальным количеством ошибок можно опять же по уравнениям алгебры логики. Поэтому алгоритмизация системы управления будет сводиться к составлению логических уравнений для всех выходных и промежуточных (внутренних выводов) переменных.

Синтез логических уравнений осуществляется сравнительно просто для комбинационных систем управления. Значительно сложнее обстоит дело с синтезом последовательностных систем управления. С появлением релейно-контактной аппаратуры и логических элементов осуществлялись попытки создания формализованных методов синтеза последовательностных систем управления. Наиболее известны методы синтеза:

- а) на основе таблиц переходов и карт Карно;
- б) на основе циклограмм.

Однако громоздкость и не универсальность этих методов ограничивают их применение.

Еще более сложным представлением является использование нейро-сетевых и нечетких систем управления.

В курсовом проекте рекомендуется для синтеза систем управления воспользоваться представлением алгоритма автоматизации в виде содержательного описания функционирования объекта. Это описание работы системы управления осуществляется на естественном языке с использованием вспомогательных таблиц, схем и диаграмм. Оно является исходным материалом для последующего математического описания работы автоматики с помощью логических уравнений.

Содержательное описание предусматривает описание условий возникновения (включения), сохранения и исчезновения (отключения) каждой выходной и промежуточной переменной в различных режимах работы объекта. Оно должно быть таким, чтобы на его основе для каждой выходной и промежуточной переменной можно было записать логическое уравнение. Для этого каждая логическая переменная должна быть обозначена и определена, в каком состоянии она имеет значение «лог. 0» и в каком состоянии «лог. 1». Затем по содержательному описанию для каждой выходной и промежуточной переменной устанавливается связь между логическими переменными, грубо говоря, путем замены слов разговорной речи И, ИЛИ, НЕ и им подобным логическими операциями умножения (конъюнкции), сложения (дизъюнкции) и отрицания (инверсии).

Промежуточные переменные (они еще называются внутренними выходами или памятью) вводятся в следующих случаях:

а) для сохранения выходной переменной, если продолжительность воздействия входной переменной (включающего сигнала) меньше требуемой длительности (аналогично реле с самоблокировкой, включаемому от нажатия кнопки);

б) для задержки кратковременного импульсного воздействия входной переменной (входного сигнала) на время, необходимое для прохождения этого сигнала по цепочке последующих элементов;

в) для разделения повторяющихся комбинаций входных переменных, при которых должны быть различными выходные переменные.

Переменной «Память», выполняющей функции пунктов «а», «б», как правило, является сама выходная величина, вводимая в правую часть уравнения операций логического сложения. В релейно-контактных схемах это аналогично применению блокирующих контактов включаемого аппарата, шунтирующих кнопку «Пуск».

Введение логической переменной «Память», выполняющей указанные в пункте «в» функции, несколько сложнее и требует, как правило, составления дополнительного содержательного описания возникновения и исчезновения этой переменной. Дополнительное содержательное описание непосредственно не вытекает из последовательности работы механизмов и вводится лишь на этапе составления математических выражений.

После составления исходных логических уравнений необходимо попытаться их упростить следующим образом:

- прямым использованием законов алгебры логики;
- выделением общих частей, входящих в уравнения для различных выходных величин;
- минимизацией по карте Карно или методом Квайна.

При аппаратной реализации систем управления возникает задача сокращения требуемой номенклатуры элементов. В этом случае полученные упрощенные логические уравнения путем использования закона инверсии (закона де Моргана) преобразуются к желаемому виду.

Логические уравнения сложно использовать для описания систем управления, содержащих счетчики, распределители, шифраторы, дешифраторы, сдвиговые регистры и т. п. Поэтому для этих случаев алгоритм автоматизации представляется в виде содержательного описания функционирования системы. Должна быть обоснована емкость счетчика, количество разрядов регистра, используемый код, необходимый дешифратор, описание считываемых или распределяемых сигналов и т. п.

При составлении содержательного описания работы системы управления еще не выбраны преобразователи измерительной информации, не уточнено место их расположения. Поэтому рекомендуется вести речь не о сигналах преобразователей, а о возникшей ситуации, так как возникновение этой ситуации при дальнейшей разработке

может оцениваться по каким-либо косвенным показателям. Например, не рекомендуется писать: «При поступлении сигнала от преобразователя (датчика) исходного положения механизма...», а следует: «При наличии сигнала об исходном положении механизма...».

Содержательное описание сопровождается составлением упрощенной функциональной схемы, представленной рисунком в пояснительной записке.

Для этого системы управления изображаются в виде «черных ящиков» с указанием входных и выходных переменных.

Обозначения, использованные в содержательном описании и на функциональной схеме, должны быть пояснены. Функциональную схему проектируемой МС удобно совмещать с кинематической схемой.

В пояснительной записке к курсовому проекту в рассматриваемом разделе должно быть представлено:

1. Выделение основных функциональных узлов, из которых будет состоять проектируемая МС. Такими функциональными узлами являются, как правило, технологическое оборудование, пульта и посты управления, приводы и системы управления приводами, блоки управляющие и информационные и т. п.

2. Упрощенная функциональная схема.

3. Требования к используемым механизмам (реверсивный или нереверсивный привод, диапазон и плавность регулирования выходной величины, точность остановки, необходимые выдержки времени, ограничения на перемещение подвижных частей и т. п.).

4. Указание о последовательности функционирования при ручном и (или) наладочном режимах работы, а также при контроле функционирования системы управления.

5. Перечень и обозначение всех логических переменных, необходимых для функционирования систем в различных режимах работы, придаваемые им логические значения 0 или 1, представленные в таблице или в иной форме.

6. На основе предполагаемой элементной базы для реализации системы управления обоснование вида представления алгоритма функционирования системы управления.

7. Если система управления реализуется на программируемом контроллере с программированием по схеме алгоритма:

а) описание реализуемых функций в различных режимах работы и принцип построения схемы алгоритма;

б) схема алгоритма, изображенная в соответствии с требованиями ГОСТ 19.002-80;

в) описание функций составных частей алгоритма и связей между ними. При реализации системы управления на логических элементах или на программируемых контроллерах с программированием на языке уравнений алгебры логики или РКС:

а) для каждой выходной переменной содержательное описание условий ее возникновения и исчезновения и логическое уравнение с необходимыми пояснениями;

б) обоснование необходимости введения промежуточных переменных типа «Память». На этом этапе целесообразно задуматься о соотношении длительности команд и длительности их исполнения. Например, если предполагается использование команд с коммутационных аппаратов типа кнопок, ключей с самовозвратом и т. п., и сигналов преобразователей (датчиков) промежуточного положения механизмов с исчезающим воздействием, тогда длительность воздействия команды (сигнала) окажется меньше требуемой длительности исполнения и понадобится дополнительная переменная «Память».

в) содержательное описание и логические уравнения для вводимых промежуточных переменных;

г) обоснование необходимости введения счетчиков, распределителей, шифраторов, дешифраторов и т. п. и описание их работы в системе управления.

Технология проектирования контроллеров (систем съема информации и управления) на основе микропроцессоров и микроконтроллеров полностью соответствует концепции неразрывности процесса проектирования и отладки аппаратной и программной составляющих, принятой во всей микропроцессорной технике. Единый процесс проектирования микропроцессорной системы и ее отладки в

англоязычной литературе обозначается словом development. Важной особенностью применения контроллеров является работа в реальном масштабе времени, т.е. гарантированная реакция на внешние события в течение определенного интервала времени. Очевидно, что решение задачи совместной отладки аппаратной и программной составляющих в реальном масштабе времени при произвольной структуре и схемотехнике микропроцессорного контроллера является весьма сложной, дорогостоящей и долговременной работой.

В качестве основного метода проектирования и отладки микропроцессорных систем фирмой Intel в 70-х годах был предложен метод внутрисхемной эмуляции. Основой этого метода является моделирование разрабатываемой системы с использованием средств инструментальной специализированной ЭВМ — схемного эмулятора. В соответствии с первоначальной идеей схемный эмулятор, представляет собой, по сути, конструктор, должен иметь все аппаратные средства, которые могут понадобиться для реализации целевой системы, плюс средства управления отладкой. Вначале контроллер конфигурировался из аппаратуры эмулятора, и разрабатывалась управляющая программа, далее на пустую макетную плату устанавливалась розетка целевого микропроцессора и схемы ближайшего обрамления, эмулятор своей эмуляционной вилкой включался в розетку вместо микропроцессора и начинался поэтапный перенос аппаратных средств с соответствующими программными фрагментами из эмулятора на плату контроллера. Чтобы обеспечить такой перенос, адресное пространство памяти и ввода-вывода схемного эмулятора картируется с образованием сегментов, которые могут быть связаны с аппаратурой, находящейся как в нем самом, так и на целевой плате.

Основным преимуществом метода внутрисхемной эмуляции является упорядоченность процесса проектирования, который может быть разделен на ряд отдельных этапов. На каждом этапе все ошибки локализованы во вновь создаваемом аппаратном и программном обеспечении, фундаментом являются заведомо работоспособные средства эмулятора. Основным недостатком такого глобального под-

хода к эмуляции является чрезвычайная дороговизна инструментальных средств. Это усугублялось в первое время тем, что до появления персональных ЭВМ фирма Intel пошла по пути создания отладочных комплексов типа Intellec в виде собственной специализированной мини-ЭВМ с оригинальной операционной системой ISIS.

В настоящее время средства моделирования в схемных эмуляторах, в большинстве случаев замещают только целевую микропроцессорную БИС и память. Создание методики отладки подсистемы ввода-вывода ложится на разработчика контроллера. Автор в качестве методики проектирования и отладки микропроцессорных контроллеров предлагает использовать типовые функционально-топологические модули. Термин функционально-топологический модуль в данном случае подразумевает, что аппаратура выполняет законченную типовую функцию, реализована в виде устоявшейся совокупности компонент (микросхем, пассивных элементов и т.п.), на печатной плате с определенными технологическими нормами. Топология является неотъемлемой составляющей модуля, поскольку характеристики современной прецизионной элементной базы могут быть реализованы только при правильном конструировании печатной платы. Таким образом, после определения схемотехнических решений не рекомендуется использовать автоматическое размещение элементов и трассировку, а после получения хороших результатов эксплуатации нельзя произвольно менять топологию функционального модуля.

Предпосылкой к использованию функционально-топологических и программных модулей является принцип магистрально-модульного построения микропроцессорных систем на основе однокристальных микропроцессоров с фиксированной системой команд. (рис. 4.2).

Магистрально-модульная организация подразумевает, что память и интерфейс ввода-вывода выполнены в виде модулей, которые обмениваются информацией с микропроцессором через магистраль. Обработку данных осуществляет микропроцессор, как правило, и обмен данными ведется под его управлением и через его внутренние регистры. На логическом уровне микропроцессорная система представля-

ется в виде регистровой модели. Обращение микропроцессора к ячейкам памяти и регистрам модулей ввода-вывода осуществляется по адресам, которые сводятся разработчиком в карту памяти и устройств ввода-вывода. Параметры магистрали (разрядность шин адреса, данных и управления, протокол и диаграммы обмена) определяются либо каким-нибудь официальным стандартом, либо аналогичными параметрами микропроцессора, которые являются в этом случае стандартом де-факто. Параметры магистрали определяют предельные характеристики производительности микропроцессорной системы.

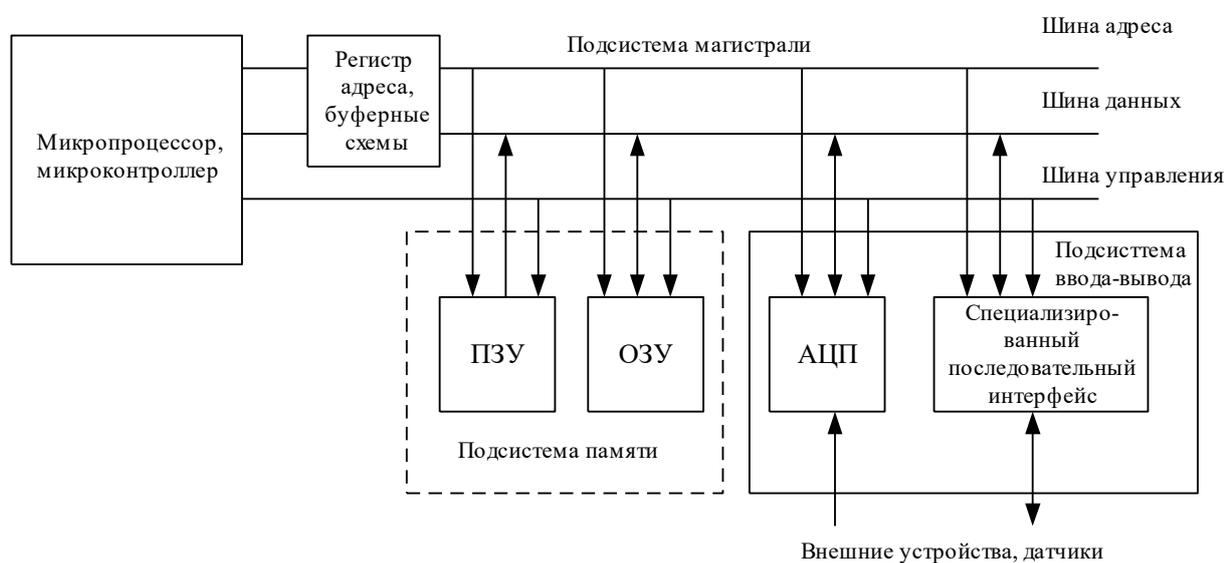


Рис. 4.2. Магистрально-модульная организация микропроцессорных систем

Проектирование микропроцессорных систем с использованием функционально-топологических модулей осуществляется в два этапа. На первом этапе на макетной плате создается и испытывается сам модуль, разрабатывается программное обеспечение для его обслуживания. При этом макетная плата проектируется с полноценной топологией печатных проводников, обеспечивающей согласование по волновому сопротивлению и экранирование от наводок, но с дополнительными элементами, обеспечивающими отладку. Модуль отлаживается во взаимодействии с работоспособным процессорным моду-

лем, с которым он в дальнейшем будет объединяться на плате. На втором этапе на основе процессорного ядра и отработанных функционально-топологических модулей ввода-вывода и обрамления разрабатывается заказной контроллер. Очевидно, что набор функционально-топологических модулей в значительной степени привязан к тому процессорному ядру, с которым был отлажен.

Особенностью микропроцессорных контроллеров является то, что они сами интегрируются в некоторый объект (embedded controllers). Это предполагает, что перед разработчиком микропроцессорной системы такого рода стоит задача полного цикла проектирования, начиная от разработки алгоритма функционирования и заканчивая комплексными испытаниями в составе изделия, а возможно и сопровождением при производстве. Основные этапы цикла разработки микропроцессорного контроллера отображены на рис. 4.3.

Технические требования начинают цикл проектирования микропроцессорного контроллера. Особенностью именно микропроцессорных контроллеров является то, что возможности их программирования подвигают заказчика заложить максимально широкие функции управления, чтобы иметь возможность использовать контроллер для управления целой гаммой аналогичных приборов. Критерием выбора должна служить экономическая целесообразность любого увеличения объема аппаратных средств, что определяется в результате исследования рынка приборов данного типа, и максимальное улучшение показателя цена/функциональные возможности. На этом этапе явно или неявно формулируются требования к типу используемого микропроцессора или микроконтроллера. Этап разработки алгоритма управления является наиболее ответственным, поскольку ошибки этого этапа обнаруживаются при испытаниях законченного изделия и приводят к дорогостоящей переработке всей системы управления. Прорабатывается несколько вариантов алгоритма, обеспечивающих выполнение технических требований с использованием наработанных ранее функционально-топологических модулей. Основные варианты отличаются соотношением объема программного обеспечения и аппаратуры.

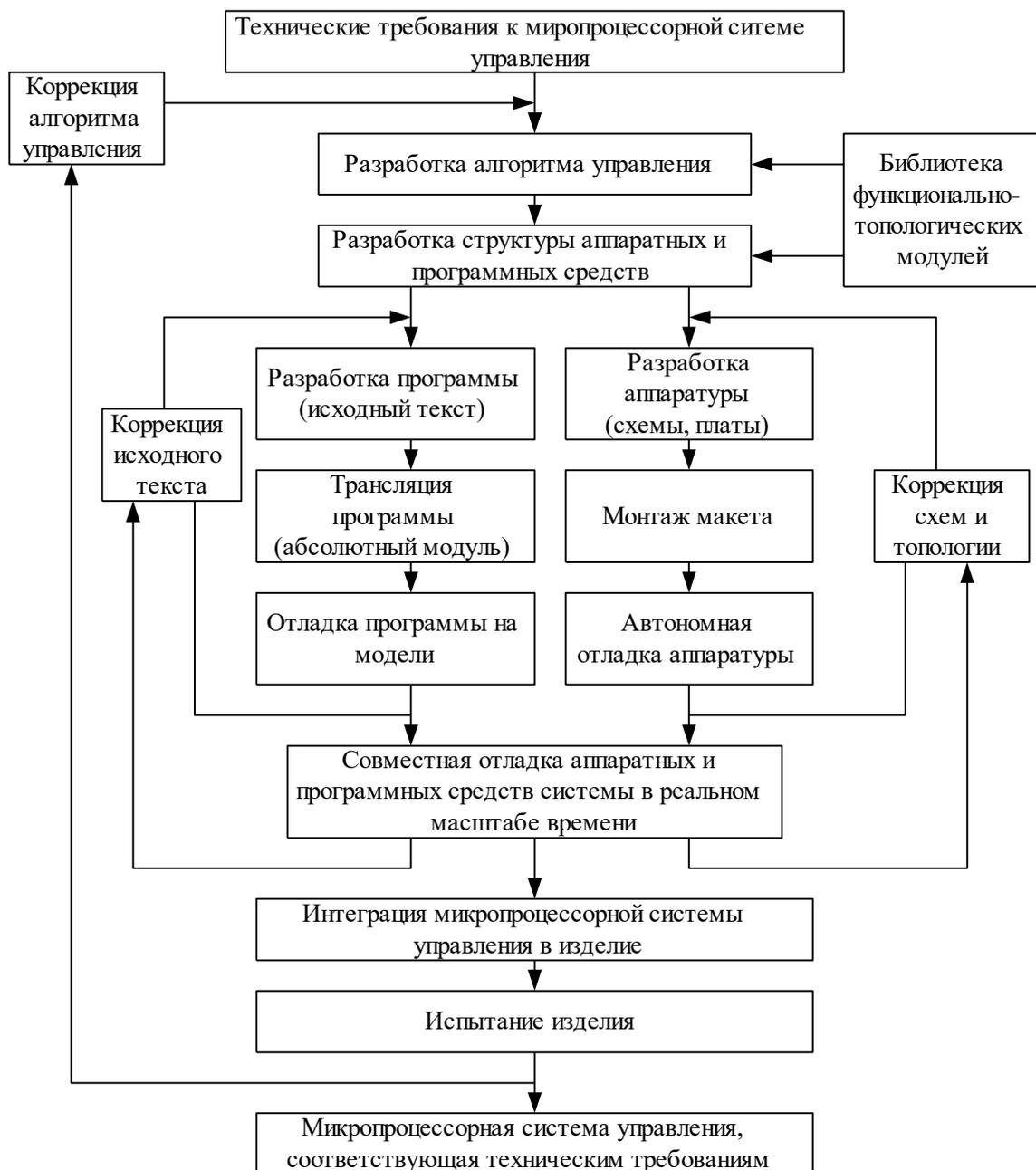


Рис. 4.3. Этапы проектирования микропроцессорного устройства

Критерием выбора является максимальное увеличение программы и уменьшение аппаратуры при обеспечении заданных показателей быстродействия и надежности в полном диапазоне эксплуатационных воздействий. Часто определяющим требованием является возможность размещения кода управляющей программы во внутренней памяти микроконтроллера, что позволяет обеспечить ее защиту. На этом этапе окончательно определяется тип микропроцессорной БИС и

важнейших схем обрaмления (flash-памяти, ПЛИС, программируемых интерфейсов, АЦП и т.п.).

На этапе разработки структуры микропроцессорного контроллера окончательно, определяется состав имеющихся и подлежащих разработке аппаратных модулей, протоколы обмена между модулями, типы разъемов. Поскольку контроллер встраивается в изделие, выполняется предварительная проработка конструкции плат. В части программного обеспечения определяется состав и связи программных модулей, язык программирования. На этом же этапе производится выбор средств проектирования и отладки.

Содержание этапов разработки исходного текста программы, трансляции и отладки логических связей на модели существенно зависит от используемых системных средств. В настоящее время ресурсы микропроцессоров и даже 8-разрядных микроконтроллеров достаточны для поддержки программирования на языках высокого уровня. Это позволяет использовать все преимущества структурного программирования, разрабатывать программное обеспечение как проект с использованием отдельно транслируемых модулей. Одновременно продолжают широко использоваться языки уровня ассемблера, особенно при необходимости обеспечить контролируемые интервалы времени. Задачи предобработки данных часто требуют использования вычислений с плавающей точкой, трансцендентных функций. В настоящее время самым мощным средством разработки программного обеспечения для контроллеров являются интегрированные кросс-системы программирования на языках высокого уровня типа Паскаль, Си. Система Паскаль-51, например, включает редактор текста, компилятор с редактором связей, библиотеку стандартных функций периода выполнения и символический отладчик. Такие системы позволяют резко, сократить затраты времени на создание и коррекцию программного обеспечения, что весьма важно, поскольку на рис. 2 видно, что эти этапы составляют внутренний, наиболее часто повторяющийся цикл в последовательности этапов разработки микропроцессорной системы.

Другой внутренний цикл, выполняемый параллельно, составляют этапы создания аппаратуры: разработка общей принципиальной схемы и разводка топологии плат, монтаж макета и его автономная отладка. Эти этапы можно считать завершенными после того, как «оживает» магистраль микропроцессорной системы и через нее можно обратиться к памяти и блокам ввода-вывода. Время выполнения этих этапов зависит от имеющегося набора опробованных функционально-топологических модулей и квалификации разработчика. Распространенными системами проектирования (CAD – computeraided design), используемыми на этапе ввода принципиальной схемы и разработки топологии являются PCAD (ECCELEDA) и OrCad. Эффективность их использования значительно зависит от имеющегося у разработчика объема библиотек используемых элементов.

Этап совместной отладки аппаратуры и программного обеспечения в реальном масштабе времени является самым трудоемким и обязательно требует использования таких высокопроизводительных средств (developmenttools), как схемный эмулятор, эмулятор ПЗУ, логический анализатор и генератор программируемых последовательностей. Выбор одного из перечисленных средств обусловлен используемым методом отладки. Этап завершается, когда аппаратура и программное обеспечение совместно обеспечивают выполнение всех шагов алгоритма работы системы. В конце этапа код программы управления «зашивается» с помощью программатора в энергонезависимую память и проверяется работа контроллера без участия эмулятора. Отладка на этом этапе ведется в лабораторных условиях с питанием от источника, обеспечивающего максимальную защиту аппаратуры. Часть внешних источников информации может моделироваться.

Этап интеграции контроллера в объект управления заключается в повторении работ по совместной отладке аппаратуры и управляющей программы, но при работе в собственном отсеке изделия, питании от штатного источника, с информацией от штатных устройств и датчиков. Осложнения, как правило, возникают из-за электромагнитной несовместимости исполнительных устройств, разработанных ранее, с микропроцессорной системой управления. Много времени на

этом этапе уходит на ликвидацию одиночных сбоев. Эту проблему можно решить с помощью программного резервирования, но только при наличии резерва памяти программ. На этом же этапе проводится и калибровка прибора с занесением параметров во flash-память.

Испытания изделия с микропроцессорным контроллером можно разделить на комплексные и специальные. Особенностью комплексных испытаний является то, что для наблюдения за микропроцессорным контроллером в реальных условиях не всегда применимы лабораторные средства отладки. Автономные отладочные средства менее развиты и при этом существенно дороже. Специальные испытания (на электромагнитную совместимость, климатические и т.п.) проводятся по обычным методикам. После успешного проведения испытаний появляется файл с окончательной версией кода управляющей программы для программатора или для завода-изготовителя микроконтроллеров, который осуществляет масочное программирование внутренней памяти программ.

#### **4.7. Функциональная схема проектируемой мехатронной системы**

Функциональная схема составляется на основе требований к работе системы управления, предполагаемой реализации ее узлов и алгоритма работы отдельных механизмов. Она используется для изучения принципа действия системы управления и разработки принципиальных схем.

Функциональную схему проектируемой МС целесообразно совмещать со структурной схемой, на которой кроме основного оборудования условно изображаются преобразователи измерительной информации с учетом места их расположения, а также приводы и системы управления ими, посты управления, элементы сигнализации и контроля. На функциональной схеме допускается изображать конкретные элементы, участвующие в процессе, и связи между ними. Вместо связей можно изображать конкретные соединения между элементами и устройствами (провода, кабели).

Функциональные части системы управления изображаются в виде прямоугольников произвольных размеров или условных обозна-

чений, установленных ГОСТами. Графическое построение схемы должно давать наиболее наглядное представление о последовательности взаимодействия функциональных частей. На линиях взаимосвязей стрелками необходимо обозначить направление хода взаимодействия.

При изображении функциональных частей в виде прямоугольников наименования и обозначения рекомендуется вписывать внутри прямоугольников.

При большом количестве функциональных частей допускается взамен наименований и обозначений проставлять порядковые номера, как правило, сверху вниз в направлении слева направо. В этом случае наименования и обозначения указывают в таблице, помещаемой над основной надписью чертежа.

В случае применения для управления МС микропроцессорных систем с широкой номенклатурой блоков на функциональной схеме можно отражать только используемые в системе управления блоки. Если будут применяться готовые блоки, то можно не раскрывать их содержимое, а изображать прямоугольниками. Если же блоки требуют специального изготовления и разрабатываются в проекте, то необходимо их представить в виде, раскрывающем их принцип действия.

Допускается помещать на схеме поясняющие надписи, диаграммы или таблицы, определяющие последовательность процессов во времени.

В пояснительной записке к курсовому проекту в соответствующем разделе должны быть представлены:

- а) ссылка на чертеж, на котором изображена функциональная схема с пояснениями, на основании каких материалов она составлена;
- б) пояснения к функциональной схеме, позволяющие быстро разобраться в ней, обращая особое внимание на дополнительно вводимые функциональные части и обозначения, принятые условности и допущения при изображении схемы;
- в) количество и размещение пультов управления, перечень необходимой коммутационной аппаратуры на пультах управления;
- г) основные решения по сигнализации и контролю за работой системы управления.

#### **4.8. Выбор элементной базы системы управления**

Задача выбора элементной базы для построения системы управления является неоднозначной (многовариантной), и ее следует решать в тесной связи с технологией работы проектируемых МС, условиями эксплуатации, с имеющейся элементной базой. Кроме того, надо учитывать затраты на ее обслуживание и ремонт в процессе эксплуатации. Выбор элементной базы в определенной степени должен также определяться исходя из квалификации обслуживающего персонала, с учетом роста образовательного уровня.

Выбор элементной базы следует начинать с ряда крупных блоков, входящих в систему. Например, выбирается тип привода и станция управления двигателем, а также осуществляется выбор «сердцевины» блока управления исходя из сложности решаемой задачи, быстродействия работы системы, опыта и квалификации обслуживающего персонала и других факторов.

Остальная элементная база системы выбирается уже на основе технических характеристик ранее выбранных крупных блоков и из технологических особенностей работы проектируемой МС.

Реализация блоков управления возможна аппаратная (с использованием логических элементов) и программная (на базе устройств программируемой логики и микропроцессорных устройств).

Выбор программируемых устройств зависит от задач, возлагаемых на систему управления. Широкий круг задач управления может быть решен на программируемых больших интегральных схемах с матричной структурой. Среди них основными являются программируемые логические матрицы (ПЛМ) и программируемые постоянные запоминающие устройства (ПЗУ).

Если система управления включает в основном задачи разветвленного логического управления и в меньшей степени задачи непрерывного регулирующего управления, то целесообразно использовать широкую номенклатуру программируемых контроллеров (например, типа Микро- ДАТ, Easy (производство Moeller), CPM1, CQM, ZEN (производство Omron), LOGO, SIMATIC, SITOP (производство Siemens), ALPHA, FX (производство MitsubishiElectric, LG и др.). Такие

контроллеры предназначены в основном для реализации логических, временных и счетных функций управления по программам, записываемым в их запоминающие устройства. Отличительной особенностью таких контроллеров является простота программирования, не требующая знания специальных языков программирования и команд используемых микропроцессоров. Например, программирование контроллеров ZEN и LOGO проводится на языке релейно-контактных схем (лестничных диаграмм).

Программируемые контроллеры СРМ1, SIMATIC и подобные им кроме логических операций позволяют проводить математические вычисления, расширяющие область их применения. Малые габариты, масса и повышенная надежность позволяют приблизить средства управления к объекту, размещая их в пультах управления. Программирование таких контроллеров требует специальных знаний, навыка и специальных устройств отладки программ.

Программная реализация систем управления возможна на базе элементов агрегатного комплекса Микро - ДАТ. Микро - ДАТ - торговая марка комплекса технических средств для локальных информационно-управляющих систем (КТС ЛИУС-2), отражающая его отличительные особенности и основное назначение: использование современной микропроцессорной базы (Микро) в программируемых контроллерах диспетчеризации (Д), автоматике (А), телемеханики (Т).

Аппаратные и агрегатные средства Микро - ДАТ реализуют все типовые информационные и управляющие функции современных АСУ ТП: контроль, регулирование, логическое управление, отображение технологической информации и передачу информации; могут использоваться в качестве «встроенных» средств автоматизации отдельных станков, станочных линий, промышленных манипуляторов, робототехнических комплексов, кузнечнопрессового, литейного и другого технологического оборудования.

Кроме того, для мобильных и переносных МС возможно применение специализированных однокристалльных микроконтроллеров, например, типа MSP430 производства TexasInstruments или на AVR-

процессорах (серий AT-Tiny, AT-classic, AT-Mega) производства ATME1 и др.

Для построения систем, требующих обработки большого количества информации и работы в реальном масштабе времени, можно применять цифровые сигнальные процессоры, например, типа TMS320 производства TexasInstruments или аналогичные. Если при разработке МС нет жестких требований по массогабаритным характеристикам, то возможно применение промышленных компьютеров в различных форм-факторах.

Исходным материалом для выбора количества и места установки преобразователей является количество и вид информации, использованной при математическом описании работы МС. Решение вопроса о получении необходимой информации неоднозначно, так как имеются прямые, а также косвенные методы измерения, в которых необходимая информация получается путем математической обработки результатов прямого измерения величин, непосредственно не требующихся для реализации математического описания. Например, измерение пути может осуществляться специальным преобразователем пути (прямой метод) или интегрированием скорости по времени (косвенный метод).

Задача выбора вида информации, метода ее получения и необходимого числа преобразователей решается в два этапа:

1. На этапе составления математического описания выбирается тип измерительной информации, который позволяет реализовать систему.

2. На этапе выбора преобразователей прежде всего изучается имеющаяся элементная база, т.е. виды и типы преобразователей, нормальные условия их работы, конструктивное исполнение, особенности установки и эксплуатации. Затем принимается решение об использовании прямых или косвенных методов измерения и выбираются конкретные типы преобразователей.

При выборе конкретных типов преобразователей нужно, как правило, стремиться использовать типовые преобразователи прямого измерения. Допускается использование опытных разработок по от-

дельным разновидностям преобразователей. Построение систем управления на базе преобразователей, требующих специального проектирования, не рекомендуется.

Общие сведения об используемых в настоящее время принципах преобразования измерительной информации можно получить из литературы.

При выборе аппаратуры желательно комплектовать систему управления устройствами одной информационной системы с единым сквозным унифицированным сигналом.

При выборе преобразователей линейных и угловых перемещений рекомендуется использовать бесконтактные методы измерения с применением сельсинов, поворотных трансформаторов, индуктосинов, цифровых преобразователей.

В качестве преобразователей скорости механизмов следует применять прецизионные тахогенераторы переменного и постоянного токов.

При выборе силоизмерительных преобразователей (усилий, веса, момента) рекомендуется базироваться на разнообразных конструктивных решениях с использованием магнитоупругого эффекта, а также на других типовых преобразователях.

Элементная база для построения МС постоянно совершенствуется, обновляется и пополняется новыми разработками. Поэтому необходимо изучить новинки и передовой опыт в области построения МС за последние 3-5 лет по отраслевым научно-техническим журналам и Интернету.

Следует отметить, что при отсутствии к проектируемой МС особых требований необходимо стремиться к применению дискретных датчиков или датчиков с цифровым интерфейсом, избегая применения аналоговых.

В пояснительной записке к курсовому проекту в соответствующем разделе должны быть представлены:

а) перечень информации, необходимой для проектирования рассматриваемой МС;

- б) краткий обзор существующих преобразователей, обеспечивающих получение указанной информации;
- в) обоснование использования косвенных методов получения информации;
- г) перечень выбранных преобразователей с указанием основных технических данных и анализом возможности использования их в проектируемой МС;
- д) описание особенностей работы преобразователей (каким образом осуществляется воздействие на него, характер выходного сигнала, требуемые источники питания и т. д.);
- е) обоснование места размещения преобразователей;
- ж) описание конструктивных особенностей их установки и крепления. Этот раздел целесообразно иллюстрировать рисунками и схемами.

#### **4.9. Разработка принципиальной электрической схемы**

Принципиальная схема - это схема, определяющая полный состав элементов и связей между ними и дающая детальное представление о принципах работы установки. Она служит основанием для разработки других конструкторских документов, например схем соединений.

Принципиальная схема составляется на основе функциональной схемы системы управления, требований к системе, а также имеющихся технических средств для реализации системы.

Разработка принципиальной схемы начинается с выделения на функциональной схеме тех частей (привод, преобразователи, блок управления и т. п.), которые обеспечивают автоматическую работу рассматриваемого механизма. Затем производится анализ требований к системе привода, элементам блока управления и т. д. и их выбор с учетом конкретных условий работы.

При выборе системы управления приводом необходимо ориентироваться на бесконтактные и релейно-контактные нормализованные станции управления электродвигателями, комплектные электроприводы, частотные преобразователи (инверторы), исполнительные узлы

управления гидро- и пневмоприводов. Нормализованные станции управления предназначены для ручного управления электроприводом, но, как правило, в них заложены возможности изменения схемы для осуществления управления от системы автоматики. С этой целью на клеммах станций управления предусмотрены переключки, вместо которых могут быть включены узлы и элементы автоматики без переделок схемы станции.

В соответствии с функциональной схемой и выбранной элементной базой составляется принципиальная схема. При этом следует обращать внимание на надежность работы системы управления.

При разработке принципиальной схемы системы управления следует обеспечить также безопасность системы, т.е. отказ любого элемента аппаратуры не должен приводить к исполнению ложных команд и возникновению аварийных ситуаций. Поэтому необходимо проанализировать всевозможные ситуации в системе (исчезновение и внезапное появление питающего напряжения, выход из строя преобразователей измерительной информации, внезапное отключение механизма в промежуточном положении, срабатывание защиты привода и т. п.) и принять меры к исключению нежелательных последствий.

Задача управления объектом в ручном режиме решается с учетом выбранной системы управления приводом и разработанной принципиальной схемы блока управления. Обычно на схемах нормализованных станций управления, как контактных, так и бесконтактных, приводится подключение аппаратов ручного управления электроприводом (включение, отключение, изменение частоты вращения электродвигателя и т. п.). Возможны два варианта ручного управления:

а) воздействие команд ручного управления непосредственно на систему управления электроприводом, минуя блок управления системы управления;

б) воздействие команд ручного управления через блок управления системы управления.

В первом случае при выходе системы управления из строя возможно продолжение работы в ручном режиме управления, во втором случае такая возможность исключается. Студент должен обосновать

выбор варианта воздействия команд ручного управления и реализовать в принципиальной схеме.

При выполнении курсового проекта запрещаются какие-либо переделки и изменения в выбранной станции управления. Поэтому «внутренности» бесконтактной станции управления электроприводом на принципиальной схеме могут не изображаться. Тогда допускается станцию управления электроприводом изображать в виде прямоугольника с указанием клеммных плат с соответствующей маркировкой и указанием подключения входных цепей задания, электродвигателя, тахогенератора, обмотки возбуждения и др. Релейно-контактная станция управления электроприводом, как правило, изображается полностью.

Следует обращать внимание на согласование элементов блока питания с элементами станции управления, на которые они воздействуют (по мощности, напряжению, числу контактов и т.п.). На этом же этапе решается задача места размещения согласующих элементов.

Выбор числа и типов источников питания блоков управления и преобразователей измерительной информации необходимо проводить с учетом требуемой мощности, необходимых напряжений и возможности питания блоков управления и преобразователей от одного источника. Последнее бывает недопустимо по следующим соображениям:

а) при переходе на ручное управление и отключении системы управления некоторые преобразователи, например, крайних положений механизма, должны оставаться в работе;

б) часто, особенно при использовании бесконтактных преобразователей, появляются ложные электрические цепи, делающие систему в принципе неработоспособной.

Коммутационная аппаратура для подключения источников питания к сети и соответствующая сигнальная аппаратура выбираются с учетом места расположения источников питания и имеющихся на них управляющих и сигнальных элементов.

Поскольку по принципиальной схеме в дальнейшем составляются схемы соединений, на ней должны быть отражены все электри-

ческие элементы, включая разъемы, зажимы и т. п. Поэтому при разработке принципиальной схемы продумывается размещение всех элементов схемы.

После выбора всех элементов, уточнения их размещения и определения связей между блоками, клеммными платами, разъемами и зажимами вычерчивается принципиальная схема. Схему следует выполнять в многолинейном изображении в полном соответствии с ГОСТ 2.702-69. Все элементы схемы должны иметь позиционные обозначения, а все проводники, клеммы разъемов, клеммных плат и зажимов - промаркированы. Допускается из соображений удобства работы со схемой каждый разъем, клеммное плато разбить на несколько частей, размещаемых на разных участках чертежа, но при этом все части одного элемента должны иметь одинаковые позиционные обозначения.

На принципиальной схеме должны быть однозначно определены буквенно-цифровыми обозначениями в соответствии с ГОСТ 2.710-81 все элементы, входящие в состав изделия и изображенные на схеме.

При записи буквенно-цифровых обозначений следует помнить о следующих требованиях ЕСКД:

- буквенно-цифровые обозначения состояются из прописных букв латинского алфавита и арабских цифр;

- буквы и цифры в обозначении имеют одинаковую высоту и записываются последовательно друг за другом без пробелов в одну строку, например, R1, SQ1, SF17;

- как правило, обозначение состоит из трех частей; первая часть содержит одну или несколько букв, обозначающих вид элемента, например, R - резистор, DS - запоминающее устройство. Вторая часть - порядковый номер элемента в пределах элементов одного вида, например, R2, ... , R12; C1, C2, ... , C15. Третья часть используется для элементов, разнесенных на соответствующие части. Например, DD13.2 - это цифровая интегральная микросхема DD13, часть 2 (второй логический элемент);

- порядковый номер элемента в пределах элементов данного вида назначается по схеме в нарастающей последовательности сверху вниз, слева направо.

Данные об элементах должны быть занесены в перечень элементов. При этом связь перечня с условными графическими обозначениями элементов должна осуществляться через позиционные обозначения.

Перечень элементов выполняется в виде таблицы на листах формата А4. На первом (заглавном) листе располагается основная надпись для текстовых документов, на последующих - основная надпись для последующих листов текстовых документов.

Перечень элементов оформляется в виде таблицы, заполняемой сверху вниз. Для облегчения внесения изменений между отдельными группами элементов, а также между элементами внутри групп допускается оставлять незаполненные строки.

При заполнении перечня элементов нужно помнить о следующих требованиях ЕСКД:

- элементы схемы записываются в алфавитном порядке их буквенно-цифрового (позиционного) обозначения на схеме;

- наименование элемента начинается с существительного. Например, нельзя писать «Сигнальная лампа», а нужно писать «Лампа сигнальная»;

- если имеется в схеме ряд элементов одного вида, например, конденсаторов, то не нужно для каждого элемента писать наименование «Конденсатор». Нужно в графе «Наименование» написать «Конденсаторы», подчеркнуть это слово одной чертой. В последующих строках слово «Конденсатор» не пишется, а проставляется позиционное обозначение конденсатора, его тип, технические характеристики, ГОСТ или технические условия (ТУ) и количество;

- если элемент включает в себя ряд составляющих элементов, то пишется позиционное обозначение этого элемента, наименование (подчеркнуть одной чертой) и количество таких элементов в схеме. В последующих строках пишутся позиционные обозначения составля-

ющих элементов, их наименование и количество, входящее в один экземпляр элемента.

В пояснительной записке к курсовому проекту в соответствующем разделе должно быть представлено:

а) пояснение, для какой части системы управления составляется принципиальная схема, анализ требований к системе привода и другим элементам проектируемой МС;

б) обоснование выбора основных элементов принципиальной схемы (станции управления, комплектного электропривода, исполнительных узлов гидро и пневмоприводов, коммутационной аппаратуры и т. п.);

в) анализ возможных неисправностей и аварийных ситуаций в системе и меры по исключению их нежелательных последствий;

г) обоснование выбора числа и типов источников питания;

д) согласование выходных элементов блока управления с элементами станции управления, а также преобразователей измерительной информации с входными элементами блока;

е) описание необходимых изменений в выбранном электрооборудовании;

ж) описание размещения элементов системы управления в блоках (блок-каркасах, каркасах) и связей между ними и другими элементами;

з) перечень коммутационной и сигнальной аппаратуры, располагаемой на пульте управления;

и) описание работы схемы в автоматическом и ручном режимах с указанием сигнализации и способов контроля за работой системы;

к) последовательность действий оператора при переходе с ручного режима работы на автоматический и обратно;

л) описание работы схемы при возникновении неисправностей в ней;

м) виды защиты электрооборудования.

#### 4.10. Разработка программного обеспечения системы управления

Программное обеспечение системы управления готовится тогда, когда полностью выбраны элементы системы, разработана принципиальная схема и, следовательно, окончательно приняты решения о подключении входных и выходных цепей к программируемому устройству.

Перед составлением программы необходимо определить адреса входных и выходных переменных в соответствии с их подключением к программируемому устройству. Кроме того, необходимо задать адреса промежуточным переменным, таймерам, счетчикам, константам и т. д. Желательно указанную информацию свести в таблицу (таблицы). Форма таблицы (таблиц) может быть произвольная.

С учетом принятой адресации необходимо записать составленные при разработке алгоритма управления логические уравнения. По логике работы программируемых контроллеров логические уравнения переписываются таким образом, чтобы выходные переменные находились в правой части логических уравнений. Каждое программируемое устройство управления (программируемый контроллер) имеет свои требования к записи логических уравнений. Например, при программировании контроллера Б9601 в левой части уравнений должны отсутствовать выходные переменные, если конъюнкции переменных предшествует знак дизъюнкции, то отмеченная конъюнкция переменных должна быть взята в скобки, и т. д. У других контроллеров этих требований может и не быть. Например, у контроллеров комплекса МикроДАТ такие требования отсутствуют.

Поэтому после записи логических уравнений в адресах программируемого контроллера в них необходимо учесть все те требования, которые предъявляются конкретным программируемым контроллерам.

После этих подготовительных мероприятий можно приступить к написанию программы. Программу желательно представлять в виде таблицы при программировании в уравнениях алгебры Буля либо в виде релейно-контактной схемы.

В технической документации на конкретный программируемый контроллер приводятся примеры программ. Поэтому желательно воспользоваться формами этих примеров. В любом случае в таблице для записи программы должны быть отражены: адрес команды, сама команда и комментарии к команде или к блоку программы.

После написания программы необходимо сделать некоторые выводы по ней: количество команд, требуемый объем памяти для ее записи, среднее время выполнения программ (одного скана), количество подпрограмм, время выполнения каждой из них и т. п.

В разделе курсового проекта по разработке программного обеспечения следует отразить:

- а) для каких устройств и на основании чего составляется программное обеспечение;
- б) адресацию входных, выходных и промежуточных переменных, счетчиков, таймеров и т. п.;
- в) логические уравнения в адресах программируемого устройства с учетом требований программируемого устройства к записи логических уравнений;
- г) программу с комментариями;
- д) выводы по разделу.

#### **4.11. Моделирование**

Исходной информацией для построения модели являлись математическое описание динамических процессов в форме дифференциальных уравнений и разработанная структурная схема привода.

Определяем входные и выходные координаты и внутренние параметры каждого из блоков и строим структурную модель на основе математического описания динамических процессов в форме дифференциальных уравнений.

При использовании общеизвестных допущений и обозначений координат и параметров такого объекта его динамическое поведение при  $M_C=0$  описывается следующей системой линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dU_n}{dt} = -\frac{1}{T_n}U_n + \frac{K_n}{T_n}U_y, \\ \frac{di_y}{dt} = -\frac{1}{T_y}i_y + \frac{C}{R_y T_y}\Omega_1 + \frac{1}{R_y T_y}U_n, \\ \frac{d\Omega_1}{dt} = -\frac{C}{J_1}i_y + \frac{1}{J_1}M_y, \\ \frac{dM_y}{dt} = C_{12}\Omega_1 - C_{12}\Omega_2, \\ \frac{d\Omega_2}{dt} = \frac{1}{J_2}M_y. \end{cases}$$

Если компонентами вектора состояния выбрать  $\mathbf{x}^T = [U_n i_y \Omega_1 M_y \Omega_2]$ , где  $U_n$  – напряжение преобразователя,  $i_y$  – ток электродвигателя,  $\Omega_1$  – скорость вращения электродвигателя,  $M_y$  – момент упругости механизма,  $\Omega_2$  – скорость вращения механизма, то элементы векторно-матричной модели

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u};$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}},$$

где  $\mathbf{A}$  –  $(n \times n)$  – матрица коэффициентов;  $\mathbf{B}$  –  $(n \times m)$  – матрица управления;  $\mathbf{C}$  –  $(r \times n)$  – матрица выходного сигнала, принимают следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_n} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_y T_y} & -\frac{1}{T_y} & -\frac{C}{R_y T_y} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{C}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 & C_{12} & 0 & -C_{12} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{K_n}{T_n} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1].$$

Такое представление соответствует описанию системы в пространстве состояний, где в качестве переменных состояния выбираются ранее описанные.

Полученная математическая модель электропривода может быть, реализована в Simulink.

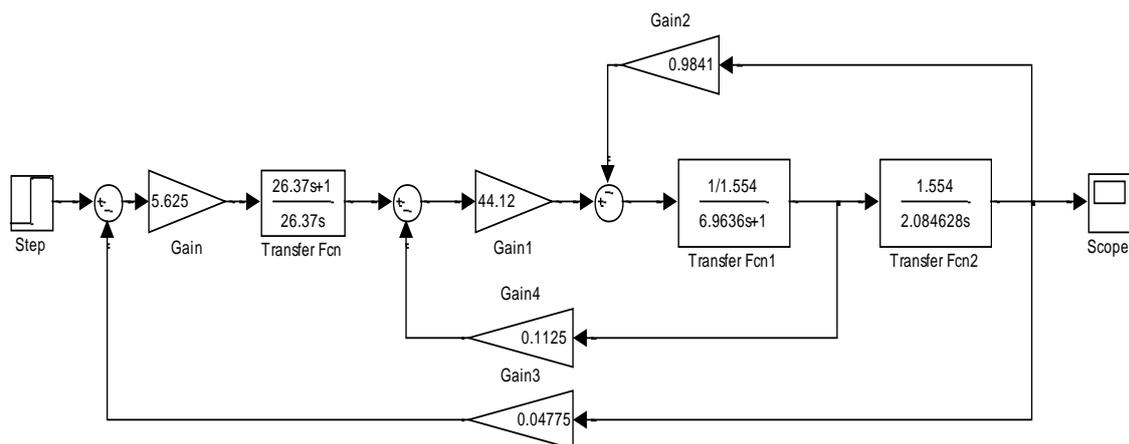


Рис. 4.4 Структурная модель ЭМС

В пакете Simulink имеется блок позволяющий выполнить моделирование векторно-матричной модели, проведя вычисление коэффициентов матриц А, В и С.

Для моделирования электромеханической системы исходную систему уравнений необходимо дополнить уравнениями элементов механической системы. При этом изменится размерность матриц коэффициентов. Схему можно представить как одно, двух- или трех-массовую.

Для этого на вход модели подается скачок напряжения, а на выходе получаем переходный процесс по скорости. Кроме того, имеется возможность снимать показания на выходе каждого из звеньев: выходное напряжение регулятора скорости, выходное напряжение тиристорного преобразователя, ток двигателя, скорость вращения ротора электродвигателя. Приводятся переходный процесс и амплитудно – частотная характеристика.

#### 4.12. Введение и заключение к проекту

Во введении должна быть отражена связь рассматриваемой исследовательской и инженерной задачи с общеэкономическими проблемами в нашей стране, четко сформулирована задача проекта, отражено состояние и тенденции проектирования подобных объектов в стране и за рубежом, основные технические решения, принятые в проекте.

В заключение проекта делаются окончательные выводы по всем разделам о новизне принятых решений и указываются возможные пути решения тех задач, которые из-за ограниченного объема проекта не нашли достаточного отражения или совсем не рассматривались.

Введение и заключение должны быть написаны в сжатой форме и не превышать 2...3 страниц.

#### **4.13. Оформление пояснительной записки и чертежей**

Пояснительная записка (ПЗ) оформляется в строгом соответствии с требованиями ЕСКД к текстовым документам. Все расчеты выполняются в международной системе единиц СИ. Требования к содержанию ПЗ изложены в ГОСТ 2.106-68, ГОСТ 2.105-95.

Образец титульного листа ПЗ курсового проекта представлен в приложении. Там же приведены примеры заглавного листа и последующих листов текстовых документов.

На всех листах пояснительной записки и чертежах проставляется шифр проекта. Он состоит из последовательно записанных шифра факультета и номера академической группы, номера варианта задания, номера варианта исходных данных, номера схемы, номера детали и обозначения документа (для пояснительной записки - ПЗ, схемы электрической функциональной - Э2, схемы электрической принципиальной - Э3, схемы электрической соединений - Э4 и т.д.).

Первый (заглавный) и последующие листы пояснительной записки должны иметь рамку и штампы в соответствии с ГОСТ 2.104-68. На заглавном листе пояснительной записки помещается содержание, а в конце ее приводится список использованной литературы, оформленный в соответствии с требованиями.

Материал записки подразделяется на разделы и, в случае необходимости, на подразделы. Разделы должны иметь порядковые номера, обозначенные арабскими цифрами без точки. Подразделы должны иметь порядковые номера в пределах каждого раздела. Номера подразделов состоят из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится. Подраздел допус-

кается разбивать на пункты, например, 1.2.3 означает: раздел первый, подраздел второй, пункт третий.

Наименования разделов и подразделов должны быть краткими и соответствовать содержанию. Записывают эти названия в виде заголовка с абзаца (отступление на 15... 17 мм) строчными буквами (кроме первой прописной).

Переносы слов в заголовках не допускаются. Точку в конце заголовка не ставят. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Примерами правильного выполнения разбивки текстового материала на разделы, подразделы и пункты являются тексты самих ГОСТов.

В пояснительной записке должны быть в краткой форме представлены все рассмотренные в проекте вопросы. Обоснования и описания должны представляться в лаконичной форме, однако не в ущерб ясности изложения. Следует обращать внимание на техническую и литературную грамотность.

Каждое вновь вводимое обозначение должно быть пояснено. Все рисунки и таблицы должны быть пронумерованы, подписаны и на них должны быть ссылки по тексту. Все иллюстрации нумеруются арабскими цифрами в пределах всей пояснительной записки (например, Рисунок 1.1, Рисунок 1.2). Допускается сквозная нумерация рисунков в пределах всей ПЗ, например: Рисунок 1, Рисунок 2 и т. д. При ссылках на рисунок следует писать «... в соответствии с рисунком 2», «Рисунок П.2».

Иллюстрации при необходимости могут иметь наименование и пояснительные данные (подрисуночный текст). Слово «Рисунок» и наименование помещают после пояснительных данных и располагают следующим образом: Рисунок 1 - Упрощенный вид станка.

Рисунки и таблицы можно выполнять непосредственно на страницах пояснительной записки. На графиках наносится масштабная сетка и указываются по координатным осям откладываемые параметры и единицы измерения. В случае выполнения графика без шкалы на осях обязательно проставляются стрелки.

Таблицы нумеруются арабскими цифрами. Слово «Таблица» и ее номер помещают слева над таблицей, например, «Таблица 1». Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела.

Таблица может иметь заголовок, который следует выполнять строчными буквами (кроме первой прописной) и помещать над таблицей после слова «Таблица» и ее номера. В конце заголовка таблиц точки не ставят.

Если строки или графы таблицы выходят за формат страницы, таблицу делят на две части. Слово «Таблица», ее номер и заголовок (при его наличии) указывают один раз слева над первой частью таблицы, над другими частями пишут слова «Продолжение таблицы» с указанием ее номера. Пример выполнения таблицы приведен в приложении.

Эскизы, схемы, графики, таблицы располагаются, по возможности, вслед за первым упоминанием в тексте. Обозначения и нумерация их элементов должны соответствовать тексту пояснительной записки.

Обязательно должны быть приведены все формулы и соотношения, по которым проводились расчеты, а также даны пояснения хода расчетов. Все расчетные соотношения и другие материалы, взятые из литературы, должны даваться со ссылкой на источник, указанный в квадратных скобках номером, под которым цитируемая книга или статья значится в перечне литературы, например, [1]. При цитировании текста из источника указывается номер источника и номер страницы в нем: например: «...надежность повышается на 10 %» [14, с. 94].

Пояснительная записка пишется в безличной форме, т. е. следует писать так: «рассматривается», «принимается» и т. д., не следует использовать такие формы, как «рассчитаю», «рассчитываем», «принимаем», «принимаю» и т. д.

Сокращение слов в тексте и подписях к иллюстрациям не допускается. Исключения составляют сокращения, установленные в ГОСТ 2.316-68.

Значения символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, должны быть приведены непосредственно под формулой. Значение каждого символа дается с новой строки в той последовательности, в какой они приведены в формуле. Первая строка расшифровки должна начинаться со слова «где» без двоеточия после него.

Например:  $S = Vt$ ,

где  $S$  - пройденный путь, м;  $V$ — скорость движения, м/с;  $t$  - время, с.

Чертежи выполняются исключительно в компьютерном графическом виде формата А1. При необходимости допускается использовать другие основные и дополнительные форматы, предусмотренные ГОСТ 2.301-68.

В учебном проекте допускается перечень элементов располагать над основной надписью чертежа на расстоянии не менее 12 мм.

В графе «Литера» основной надписи (штампа) чертежей и схем для курсового проекта проставляется буква К.

## СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейчиков Б. В. Динамическая точность систем программного управления станками. – М. : Машиностроение, 1964. – 368 с.
2. Егоров А. Д. Механика и конструирование роботов : учебник. – М. : СТАНКИН, 1997. - 510 с.
3. Правила устройства электроустановок. - СПб. : ДЕАН, 2002. – Разд. 1.
4. Михайлов О. П. Автоматизированный электропривод станков и промышленных роботов. – М. : Машиностроение, 1990. – 303с.
5. Микропроцессорное управление электроприводами станков с ЧПУ. – М. : Машиностроение, 1990. - 319 с.
6. Семко П. А. Методика расчета приводов металлорежущих станков. – Ростов н/Д., 1996. – 66 с.
7. Сосонкин М. Л. Программное управление технологическим оборудованием. – М. : Машиностроение, 1991. - 508с.
8. Лукинов А. П. Проектирование мехатронных устройств : учеб. пособие. – М. : СТАНКИН, 1996. - 126 с.
9. Цапенко М. П. Измерительные информационные системы: Структуры и алгоритмы, системотехническое проектирование. - М. : Энергоатомиздат, 1985
10. Кузьмичев Д. А., Радкевич И. А., Смирнов А. Д. Автоматизация экспериментальных исследований. – М. : Наука, 1983.
11. Государственная система приборов и средств автоматизации / под ред. Г. И. Кавалерова. - М. : ЦНИИТЭИ приборостроения, средства автоматизации и систем управления, 1981.
12. Хазанов Б. И. Интерфейсы измерительных систем. - М. : Энергия, 1979.
13. Алиев Т. М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника : учеб. пособие для техн. вузов. – М. : Высш. шк., 1991.
14. Котюк А. Ф. Датчики в современных измерениях. – М. : Горячая линия-Телеком, 2006.
15. Яковлев В. Ф., Соснин Д. А. Новейшие автомобильные электронные системы: Датчики ЭСАУ; Электронное управление ДВС; Бортовые функциональные преобразователи и др. : учеб. пособие для студ. машин. вузов. – М. : Салон-пресс, 2005.

16. Лобанов В.И. Алфавит разработчика цифровых систем / В. И. Лобанов. – М. : Горячая линия-Телеком, 2001.
17. Быстров Ю. А., Мироненко И .Г. Электронные цепи и микросхемотехника : учеб. для вузов. – М. : Высш. шк., 2002.
18. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1978.
19. Каталог направляющих ТЧК фирмы INA. Германия, 1999.
20. Металлорежущие станки : в 2 т. / под ред. Н. С. Ачеркана. – М. : Машиностроение, 1985.
21. Металлорежущие станки / А. М. Кучер, М. М. Киватицки, А. А. Покровский. – Л. : Машиностроение, 1972.
22. Обработка металлов резанием : справ. технолога / А. А. Панов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1988.
23. Орлов П. И. Основы конструирования : справ.-метод. пособие : в 3 кн. М. : Машиностроение, 1977.
24. Проектирование технологии : учеб. для студентов машиностроит. Вузов / И. М. Баранчукова и [и др.] / под общ. ред. Ю. М. Соломенцова. – М. : Машиностроение, 1990.
25. Решетов Д. Н. Детали машин : учеб. для вузов. Изд. 3-е испр. и перераб. – М. : Машиностроение, 1975.
26. Справочник по технологии резания металлов : в 2 кн. / под ред. Ю. М. Соломенцова. – М. : Машиностроение, 1985.
27. Справочник по технологии резания материалов : в 2 т. / под ред. Г. Шпура, Т. Штеферле. – М. : Машиностроение, 1985.
28. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985.
29. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. – М. : Машиностроение, 1979.
30. Тарзиманов Г. А. Проектирование металлорежущих станков. – М. : Машиностроение, 1980.
31. Шлифование фасонных поверхностей / под ред. Е. И. Ящерицина. – М., 1985.

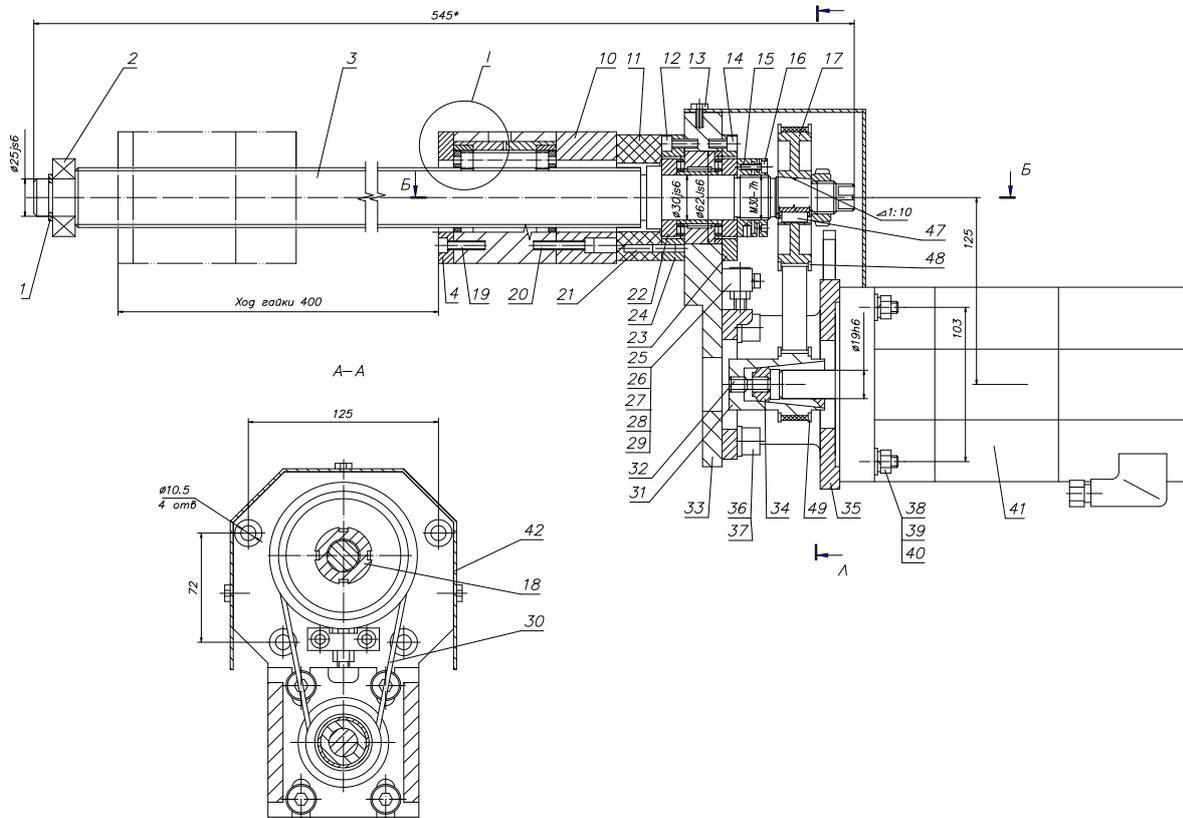
## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Состав мехатронного модуля движения. Функции его элементов.
2. Назначение мехатронного модуля (ММ) и его структура.
3. Состав ММ и связи между его компонентами.
4. 4 Функции элементов модуля.
5. 5 Основные технические характеристики механизмов преобразования движения (МПД).
6. Методика и специфика конструирования мехатронных модулей.
7. Задачи и основные этапы конструирования ММ.
8. Техническое задание и его содержание; технический и рабочий проекты.
9. Критерии оптимизации конструкции ММ.
10. САПР в конструировании ММ.
11. Основные характеристики двигателей применяемых в мехатронных модулях.
12. Вращательные и линейные двигатели.
13. 13. Двигатели переменного и постоянного тока.
14. Задачи и основные этапы энергетического расчета.
15. Предварительный выбор двигателя и проверочный расчет по моменту (силе).
16. Тепловой расчет двигателя.
17. Кинематические характеристики МПД.
18. Прямые и обратные задачи о положении и скоростях точек и звеньев механизма.
19. Определение передаточных функций МПД.
20. Силы и моменты, действующие в модулях.
21. 21 Активные и пассивные силы и моменты.
22. Приведенные массы и моменты инерции звеньев.
23. Приведение сил и моментов сил.
24. Определение сил и моментов сил, действующих на звенья модуля.
25. Динамическая модель МПД.
26. Модель МПД с учетом нелинейностей.
27. Разработка кинематической схемы модуля.

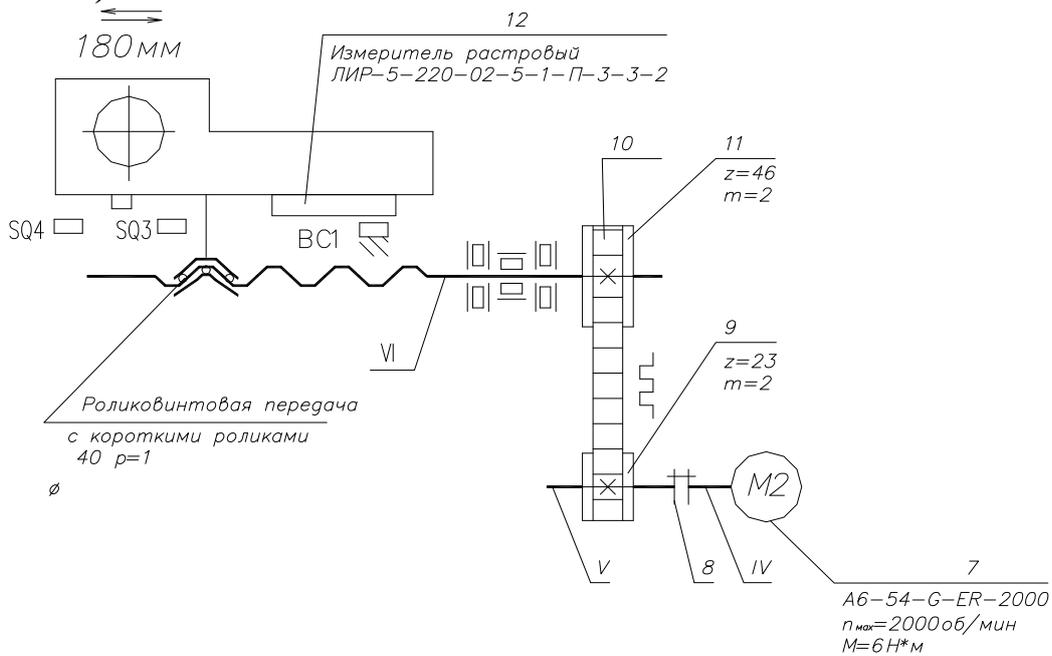
28. Выбор типа МПД и дополнительных устройств.
29. Кинематическая схема модуля и правила ее выполнения.
30. Критерии выбора МПД и методы их расчета.
31. Выбор дополнительных устройств.
32. Способы выборки люфтов в МПД.
33. Выполнение компоновочного и сборочного чертежей модуля.
34. Критерии оптимизации при конструировании.
35. Правила выполнения рабочих чертежей.
36. Агрегатно-модульный принцип конструирования.
37. Унификация и стандартизация при конструировании.
38. Обеспечение точности передачи движения при конструировании мехатронного модуля.
39. Основные погрешности, возникающие в механизмах передачи движения.
40. Расчет погрешностей и методы их компенсации.
41. Назначение и условия работы направляющих поступательного перемещения.
42. Направляющие скольжения и качения.
43. Аэростатические, гидростатические и гидродинамические направляющие и опоры.
44. Расчет направляющих.
45. Конструирование опор валов.
46. Конструирование несущих элементов.
47. Расчет несущих элементов.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

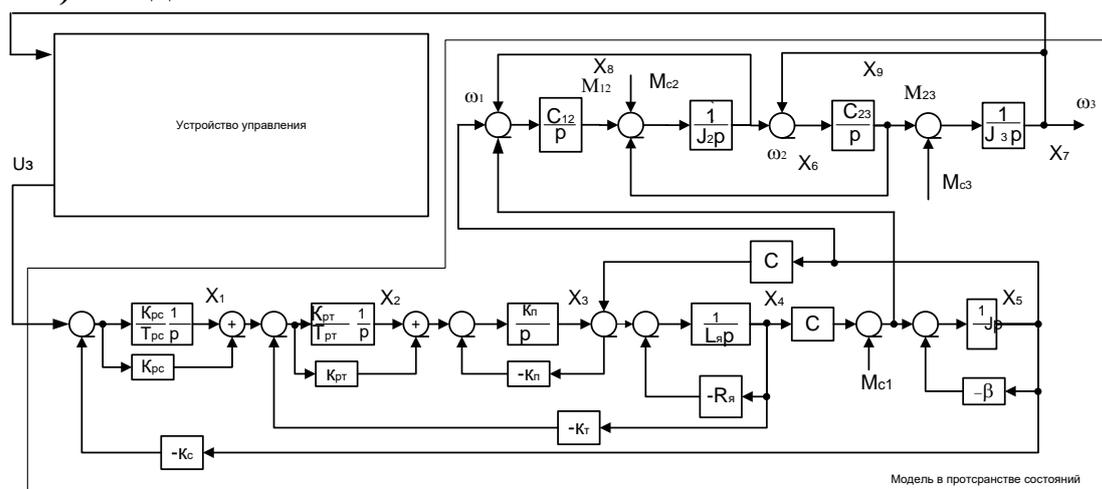
## П1. А.) Сборочный чертеж



## П1.В). Кинематическая схема



## П1.С). Модель



## П2. Пример расчета параметров механической системы

### 1. ВЫБОР МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для создания ЭМС необходимо рассчитать ее параметры. Кинематическая схема и конструкция МС разработаны. Для соблюдения условий, поставленных при проектировании, в качестве прототипа использована электромеханическая система, которая по своим характеристикам полностью соответствует электромеханическому роботу, а точнее одному из его звеньев.

### 2. ОПИСАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Механическая система представляет собой станину, на которой установлены все основные элементы. На плите, прикрепленной к боковой поверхности станины, установлен электродвигатель. В электродвигатель встроен тахогенератор, являющийся датчиком скорости. С одной стороны, на вал электродвигателя установлен фото импульсный датчик, позволяющий измерять угол поворота вала электродвигателя. С другой стороны, посредством конуса, установлен ведущий шкив ременной передачи. Через зубчатую ременную передачу вращение передается к ведомому шкиву ременной передачи. Ведомый шкив посредством шпонки установлен на промежуточном валу, встроенном в станину. Промежуточный вал установлен в двух подшипниках. На нем жестко установлена ведущая шестерня винтового цилиндрического редуктора, от которой вращение передается к ведомой шестерне винтового цилиндрического редуктора, жестко установленной на хо-

довом винте. Опорами ходового винта являются два подшипника, закрепленных на станине. На ходовом винте установлен фото импульсный датчик, позволяющий измерить угол поворота винта. Ходовой винт является основой передачи винт - гайка, служащей для преобразования вращательного движения в поступательное движение суппорта. Суппорт установлен на пяти много роликовых опорах, служащих для получения наименьшего сопротивления перемещению суппорта. В крайних положениях суппорта установлены индукционные концевые датчики, предотвращающие выход суппорта на упор при перемещении (ограничение хода). На суппорте установлена система нагрузки, представляющая собой гидравлический цилиндр двустороннего действия. В трубопроводы, соединяющие рабочие полости цилиндра, установлены регулируемые дроссели, с помощью которых регулируется давление в рабочих полостях цилиндра и тем самым сила сопротивления, которую создает цилиндр при перемещении суппорта.

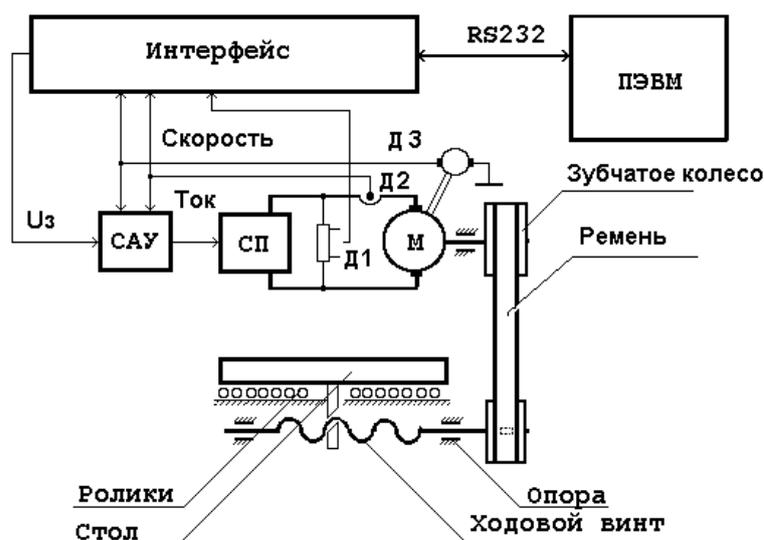


Рис. П2.1. Функциональная схема разрабатываемой системы

Для контроля за давлением в цилиндре и, следовательно, за силой сопротивления, создаваемой цилиндром, к трубопроводам подсоединены манометры. Шток цилиндра прикреплен к плите, жестко установленной на станине.

### 3. СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Механическая система представляется в виде двух массовой системы (рис.П2.2). Все параметры приведены к валу двигателя.

Для составления математической модели механической системы рассчитываются её основные параметры.

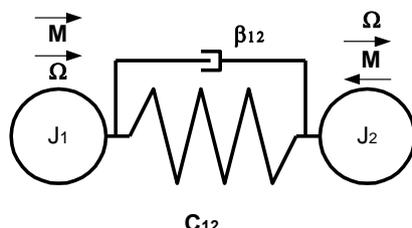


Рис.П.2.2. Исходная двух массовая система

где  $J_1$  и  $J_2$  - моменты инерции вращающихся масс;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  - их угловые скорости;  $C_{12}$  - жесткость упругой связи между двумя массами;  $\beta_{12}$  коэффициент, определяющий момент вязкого трения.

### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ИНЕРЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ

Для определения момента инерции каждый элемент условно разбивается на составные части, каждая из которых представляет собой элемент в виде кольца. Момент инерции рассчитывается для каждой составной части. Сумма моментов инерции составных частей определяет момент инерции элемента в целом.

#### МОМЕНТ ИНЕРЦИИ КОЛЬЦЕВОГО ЭЛЕМЕНТА.

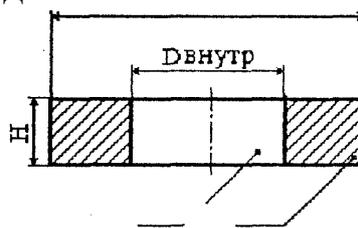
Рассчитывается по следующей методике:

$$m_2 = \rho \frac{\pi H}{4} (R_2^2 - R_1^2)$$

$$m_1 = \rho \pi R_1^2$$

$$J_2 = J_{\text{i\ddot{a}i}} - J_1$$

$$J_2 = \rho \frac{\pi H R_2^2}{2} R_2^2 - \rho \frac{\pi H R_1^2}{2} R_1^2$$



В этих формулах используется такая величина, как плотность материала  $\rho$  из которого изготовлены данные элементы.

Для более точного определения моментов инерции в расчетах не используется величина плотности, указанная в справочниках. Величина плотности рассчитывается для каждого элемента.

Значение массы получается взвешиванием. Значение объема вычисляется.

### МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ВЕДУЩЕГО ШКИВА.

Ведущий шкив (рис.П2.4) условно разбивается на четыре кольцевых элемента.

В процессе расчетов получили следующие значения параметров шкива

$$J = 1.0169 * 10^{-3} \text{ Нм}^2$$

$$m = 0,391 \text{ кг}$$

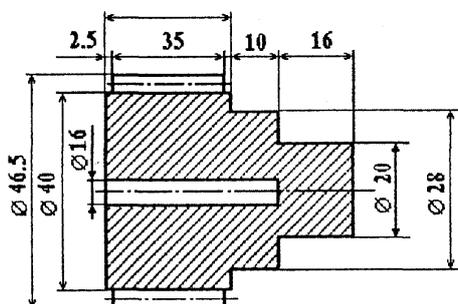


Рис. П2.4 Ведущий шкив

### МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ВЕДОМОГО ШКИВА.

Ведомый шкив условно разбивается на три кольцевых элемента.

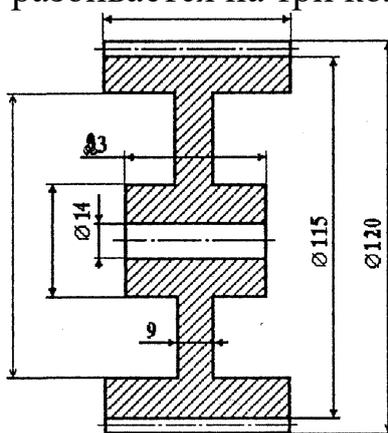


Рис. П2.5. Ведомый шкив

$$J = 32.15259 * 10^{-3} \text{ Нм}^2$$

$$m = 1,76 \text{ кг}$$

### МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ВАЛА

Промежуточный вал условно разбивается на три элемента. Для него получаем следующие значения параметров:  $J = 782.72 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^2$   
 $m = 0,655 \text{ кг}$

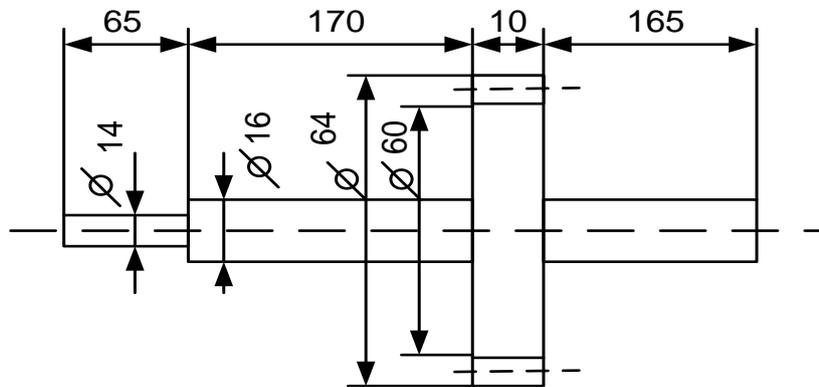


Рис. П2.6. Промежуточный вал

### МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ХОДОВОГО ВИНТА.

Ходовой винт разбивается на семь элементов и для него рассчитываются параметры.

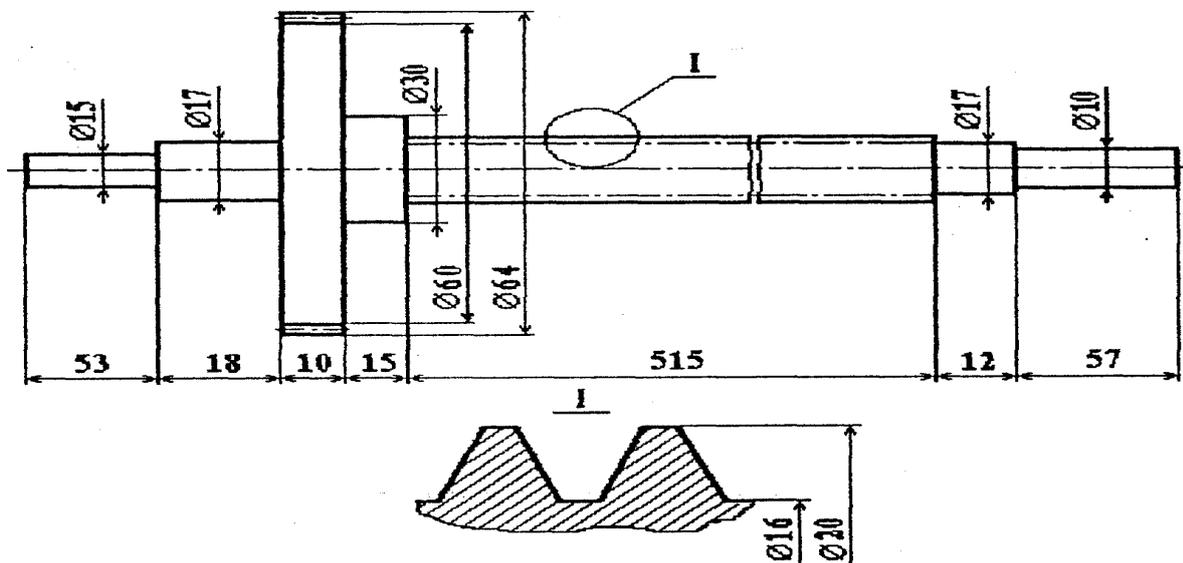


Рис. П2.7. Ходовой винт

В результате получаем:

$$J = 1401.825 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}^2$$

$$m = 1,3 \text{ кг}$$

Момент инерции датчика.

$$J = 1.96 * 10^{-4} \text{ Нм}^2$$

**МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ЯКОРЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.**

$$J = 31.36 * 10^{-3} \text{ Нм}^2$$

**МОМЕНТ ИНЕРЦИИ СУППОРТА**

$$J = m_{\text{суп}} \left( \frac{t}{2\pi} \right)^2 q = 3.83169 \cdot 10^{-5} \text{ Нм}^2,$$

где масса суппорта  $m = 38.550$ , шаг ходового винта  $t = 2$  мм.

При составлении модели двух массовой системы, моменты отдельных звеньев приводятся к валу двигателя.

**МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ПЕРВОЙ МАССЫ**

$$J_1 = J_{\text{я}} + J_{\text{дат}} + J_{\text{шк1}} + \frac{1}{i^2} (J_{\text{шк2}} + J_{\text{вал}} + J_{\text{в}} + J_{\text{дат}})$$

**МОМЕНТ ИНЕРЦИИ ВТОРОЙ МАССЫ**

$$J_2 = \frac{1}{i^2} J_{\text{суп}}.$$

Передаточное число ременной передачи  $i = 3$ .

В результате расчетов получили

$$J_1 = 0.0364099 \text{ Нм}^2$$

$$J_2 = 4.257 * 10^{-6} \text{ Нм}^2$$

## **5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ**

*Жесткость ходового винта.*

Жесткость ходового винта определяется по формуле

$$C = M / \varphi,$$

где  $M$  - крутящий момент, приложенный к ходовому винту, ( $\varphi$  - угол закручивания винта при прикладывании к нему крутящего момента.

Угол закручивания определяется:

$$\varphi = Ml / GJ_p$$

где  $M$  - крутящий момент,

$l$  - длина закручиваемого участка,

G - модуль упругости при сдвиге,

$J_p$  - полярный момент инерции сечения винта.

$$J_p = \frac{\pi d^4}{32},$$

где d - диаметр сечения вала.

$$J = 1.03007 * 10^{-8} \text{ Нм}^2$$

Закручиваемый участок представляет собой однородную винтовую поверхность, поэтому диаметр сечения постоянен по всей длине винта,  $d=18\text{мм}$ .

Расчеты производятся для механической системы, работающей при максимальном моменте двигателя.

$$M = M_{d\max}^i$$

где M максимальный момент двигателя,

i - передаточное отношение ременной передачи,  $i=3$ .

$$M=31*3=93 \text{ Нм}$$

Длина закручиваемого участка изменяется от 0 мм до 250мм. В расчетах принимается  $l=250\text{мм}$  так как при этом жесткость винта будет минимальной.

Жесткость ходового винта составит

$$C=3278.3434 \text{ Нм/рад}$$

$$C_{\text{в.пр}} = \frac{C_{\text{в}}}{i^2} = 413.4147 \text{ Нм/рад}$$

Ходовой винт является наименее жестким элементом, поэтому расчет жесткости производится только для него. Остальные элементы системы обладают гораздо большей жесткостью.

*Ременная передача* за счет использования армированного ремня, у которого вдоль тела расположен армирующий корд, представляющий собой металлическую проволоку, уложенную в несколько рядов. Металлическая проволока обладает большим сопротивлением растяжению. Поэтому ремень рассматривается как абсолютно жесткое тело.

*Промежуточный вал*, передающий вращение от ременной передачи к ходовому винту, имеет незначительную длину и достаточно большую площадь поперечного сечения, а соответственно и очень большую по сравнению с ходовым винтом жесткость. Поэтому его можно считать абсолютно жестким телом.

*Цилиндрическая винтовая передача* является без зазорной и шестерни имеют основные размеры достаточные для того, чтобы считать ее абсолютно жесткой.

Коэффициент вязкого трения рассчитывается по следующей методике:

$$b_{12} = \frac{2\alpha J_1 J_2}{J_1 + J_2}$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания системы,

$$\alpha = \frac{\lambda \Omega_{12}}{2\pi}$$

где  $\lambda$  - логарифмический декремент  $\lambda=0.1 \dots 0.3$ , принимается  $\lambda=0.2$

$$\Omega_{12} = \sqrt{\frac{C_{12}(J_1 + J_2)}{J_1 J_2}} = \sqrt{\frac{413.4147(0.0364099 + 4.257 \cdot 10^{-6})}{0.0364099 \cdot 4.257 \cdot 10^{-6}}} = 9855.22 \frac{1}{c}$$

$$\alpha = \frac{0.29 \cdot 855.22}{2 \cdot 3.14} = 313.861$$

$$b_{12} = \frac{2 \cdot 313.861 \cdot 0.0364099 \cdot 4.257 \cdot 10^{-6}}{0.0364099 + 4.257 \cdot 10^{-6}} = 2.6719 \cdot 10^{-3}$$

Приведенный коэффициент вязкого трения определяется:

$$b_{12} = \frac{b_{12}}{i^2} = 2.968 \cdot 10^{-4}$$

## 6. РАСЧЕТ КПД ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ. КПД ПОДШИПНИКОВ.

В системе установлено 4 подшипника, работающих в режиме средней загруженности. Принимается:

$$\eta = 0.97^4 = 0.8853.$$

### КПД ПЕРЕДАЧИ ВИНТ-ГАЙКА.

КПД передачи винт-гайка рассчитывается по формуле:

$$\eta_{в.г.} = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \varphi)} = 0.2987$$

где  $\gamma$  - угол подъема винтовой линии,

$\varphi$  - приведенный угол трения скольжения в резьбе,

$$\gamma = \operatorname{arctg}\left(\frac{t}{\pi d}\right) = 2.0266^\circ$$

где  $t$  - шаг винта,  $d$  - диаметр винта по делительной окружности.

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{\operatorname{Cos} \beta}\right) = 4.73^\circ$$

где  $f=0.08$  коэффициент трения в передаче, для смазанной пары закаленная сталь-бронза,  $\beta = 15^\circ$  - угол профиля зуба.

### **КПД цилиндрической винтовой передачи.**

КПД цилиндрической винтовой передачи рассчитывается по формуле:

$$\eta_{ц.в.} = \frac{C_2 \operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg}(\beta_2 + \varphi)} = 0.8078$$

где  $C_2$  - поправочный коэффициент,  $\beta_2 = 45^\circ$  угол наклона зубьев,  $\varphi$  - приведенный угол трения,

$$C_2 = \frac{N + 1.07}{N + 2.43} = 0.9997$$

где  $N$  - нормальная сила, действующая на зуб,

$$N = \frac{P}{\cos \alpha * \cos \beta} = 4514.921 \text{ Н}$$

где  $P$  - окружная сила на ведомом валу,

$$P = \frac{M}{0.5d} = 3000 \text{ Н}$$

где  $M$  - момент на ведомом валу,  $d$  - диаметр ведомого колеса,  $d = 62$  мм

Рассматривается работа установки на максимальных нагрузках. При этом:

$$M = M_{дв} i = 31.3 = 93 \text{ Н.м.},$$

где  $i$  - передаточное отношение ременной передачи,  $i = 3$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left( \frac{f}{\cos \alpha} \right) = 6.074^\circ$$

где  $f$  - коэффициент трения; для стальных зубьев при нормальной смазке и  $R = 2.5 - 0.32$  мкм,  $f = 0.08 - 0.12$ ; принимается  $f = 0.1$ .

КПД цилиндрической винтовой передачи 80.78%

### **КПД ременной передачи.**

В стенде используется зубчатая ременная передача, КПД которой принимается  $\eta = 0.97$

## ОБЩИЙ КПД МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ:

$$\eta_{об} = 0.97 \cdot 0.8078 \cdot 0.2987 \cdot 0.8853 = 0.20721$$

В устройстве установлен электродвигатель со следующими характеристиками:

$M_n = 4.4$  Нм,  $M_{max} = 31$  Нм,  $T_m = 11.1$  мс,  $T_{э} = 5.1$  мс,  $R_{я} = 0.38$ ,  
 $L_{я} = 15$  мГ,

$U_{я} = 111$  В,  $I_{max} = 58$  А,  $I_n = 8.3$  А,  $n_{max} = 2000$  Об /мин,  $C_E = 0.56$  Вс/рад,  
 $C_M = 0.56$  Нм/А.

## 7. ОРИЕНТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ СИЛЫ РЕЗАНИЯ И МОЩНОСТИ.

По эмпирическим формулам теории резания определить силы резания  $P_z, P_y$  и  $P_x$  при продольном точении заготовки из стали 40 с пределом прочности  $\sigma_B = 650$  МПа ( $65$  кгс/мм<sup>2</sup>) резцом с пластиной твердого сплава Т5К10. Глубина резания  $t = 4$  мм; подача резца  $0,6$  мм/об; скорость резания  $v = 110$  м/мин,  $8$  м/с). Геометрические параметры резца: форма передней поверхности — радиусная с фаской;  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\varphi_1 = 10^\circ$ ;  $\alpha = 8^\circ$ ;  $\gamma = 10^\circ$ ;  $\lambda = +5^\circ$ ;  $r = 1$  мм.

Силы резания при точении определяют по справочнику,

тангенциальная сила

$$P_z = C_{p_z} t^{X_{p_z}} s^{Y_{p_z}} v^{n_{p_z}} k_{p_z}$$

радиальная сила

$$P_y = C_{p_y} t^{X_{p_y}} s^{Y_{p_y}} v^{n_{p_y}} k_{p_y}$$

осевая сила (сила подачи)

$$P_x = C_{p_x} t^{X_{p_x}} s^{Y_{p_x}} v^{n_{p_x}} k_{p_x}$$

Значения коэффициентов и показателей степеней формул, возможно более близкие к условиям данного примера, т.е. для наружного продольного точения стали с пределом прочности  $\sigma_B = 75$  кгс/мм<sup>2</sup> резцом из твердого сплава:

$$C_{p_z} = 300 \quad X_{p_z} = 1 \quad Y_{p_z} = 1 \quad n_{p_z} = 1$$

$$C_{p_y} = 243 \quad X_{p_y} = 0.9 \quad Y_{p_y} = 1 \quad n_{p_y} = 1$$

$$C_{p_x} = 339 \quad X_{p_x} = 1 \quad Y_{p_x} = 1 \quad n_{p_x} = 1$$

Отличие заданных условий обработки от нормативных должно быть учтено при подсчетах сил резания путем введения соответствующих поправочных коэффициентов. Поправочные коэффициенты на характеристики механических свойств обрабатываемого материала находим в справочнике. Там же даны поправочные коэффициенты в зависимости от геометрических параметров резца. Приведенные выше значения коэффициентов  $C_p$  и показателей степеней  $X_p, Y_p$  и  $n_p$  действительны лишь для точения стали с пределом прочности  $\sigma_B = 750 \text{ МПа}$  ( $75 \text{ кгс/мм}^2$ ) резцом из твердого сплава с углами ( $\varphi=45^\circ, \gamma=10^\circ, \lambda=0$ ), так как только для этих условий обработки каждый поправочный коэффициент равен единице. Поэтому вводим следующие поправочные коэффициенты для заданных условий обработки на характеристику механических свойств обрабатываемой стали с ( $\sigma_B = 65 \text{ кгс/мм}^2$ )

$$k_{M_{p_z}} = \left( \frac{\sigma_B}{75} \right)^{n_p} = 0.9 n_p = 0.75$$

$$k_{M_{p_y}} = \left( \frac{\sigma_B}{75} \right)^{n_p} = 0.83 n_p = 1.35$$

$$k_{M_{p_x}} = \left( \frac{\sigma_B}{75} \right)^{n_p} = 0.87 n_p = 1$$

на главный угол в плане

$$k_{\varphi_{p_z}} = 0.94 \quad k_{\varphi_{p_y}} = 0.77 \quad k_{\varphi_{p_x}} = 1.11$$

на угол наклона режущей кромки

$$k_{\lambda_{p_z}} = 1 \quad k_{\lambda_{p_y}} = 1.25 \quad k_{\lambda_{p_x}} = 0.85$$

Определяем силу Римея в виду, что

$$P_z = 9.81 C_{p_z} t^{X_{p_z}} s^{Y_{p_x}} v^{n_{p_z}} k_{M_{p_z}} k_{\varphi_{p_z}} k_{\lambda_{p_z}}$$

и подставляя значения в результате получим:

$$P_z = 9.81 * 300 * 0.6^{0.75} * 110^{-0.15} * 0.9 * 0.94 * 1 = 3440 \text{ Н}$$

Аналогично получим и другие составляющие:

$$P_y = 9.81 * 243 * 4^{0.9} * 110^{-0.3} * 0.83 * 0.77 * 1.25 = 1220H$$

$$P_x = 9.81 * 339 * 0.6^{0.5} * 110^{-0.4} * 0.87 * 1.11 * 0.85 = 1320H$$

### **8. МОМЕНТЫ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ В СИСТЕМЕ.**

Момент сопротивления определяется внешней силой, приложенной к суппорту. Дополнительно к этой силе действует сила сопротивления от опоры качения. Для определения момента эта сила приводится к валу двигателя.

Внешняя сила сопротивления регулируется изменением давления, создаваемого в гидроцилиндре при перемещении поршня.

Диапазон изменения давления  $P$  от 0 до 100 кг/см<sup>2</sup>. Гидравлический цилиндр имеет диаметр поршня  $d=40$  мм. Таким образом диапазон изменения силы, создаваемой гидроцилиндром от 0 до  $F_{max}$

$$F_{max}=PS_{\pi} = 12308.8 \text{ Н}$$

Работа системы рассматривается при  $P=50$  кг/см, т.е. при внешней силе нагрузки  $F=6155$  Н.

### **9. СИЛА СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ОПОРЫ КАЧЕНИЯ.**

Опора качения представляет собой четыре ряда роликов, по 22 ролика в каждом. При движении с постоянной скоростью:

$$SD = Qk_1 + (Q + nq) - k_2,$$

где  $D$  - диаметр ролика,

$$Q = 377.79 \text{ Н}$$

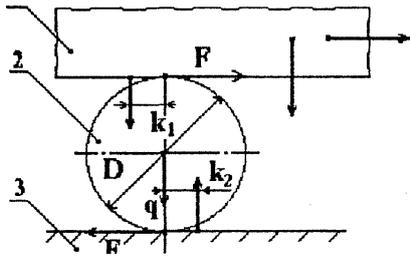
Для закаленной стали по закаленной стали :

$$k_1 = k_2 = 0.01 \text{ мм}$$

При габаритных размерах 0.5x5 мм ролик имеет вес  $q=29$ Н

Сила необходимая для перемещения звена:

$$S = \frac{Qk_1 + (Q + nq) - k_2}{D} = 6.615H$$



1 - подвижное звено,

2 - ролик,

3 – направляющая(опора),

S - сила, необходимая для передвижения звена на роликах,

Q- вес звена,

n -число роликов,

q -вес ролика,

k1 и k2 - коэффициенты трения качения в месте соприкосновения роликов соответственно со звеном 1 и с направляющей 3

Коэффициент приведения внешней силы к валу двигателя

$$K_{np} = \left( \frac{t}{2\pi} \right) \frac{1}{i} = 106.157 * 10^{-6},$$

где  $t$  - шаг ходового винта ,  $t=2$  мм,  $i$  - передаточное отношение ременной передачи.

Коэффициент редукции передачи винт-гайка

$$K_p = \left( \frac{t}{2\pi} \right) = 3.18471 * 10^{-4}$$

## 10. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ СВЕДЕНЫ В ТАБЛИЦУ.

Таблица П2

Сводная таблица

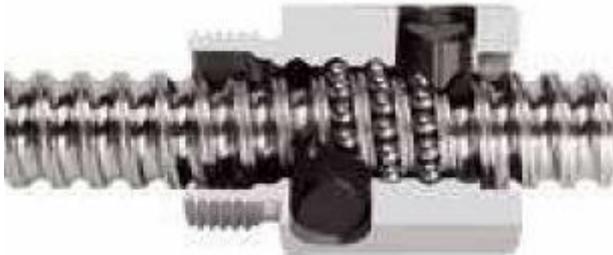
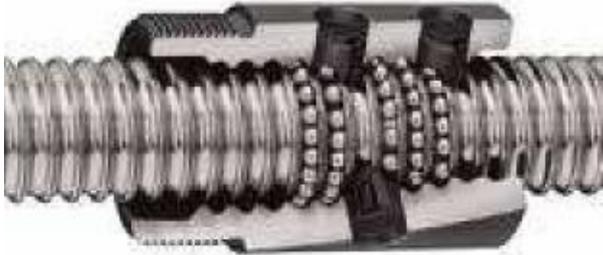
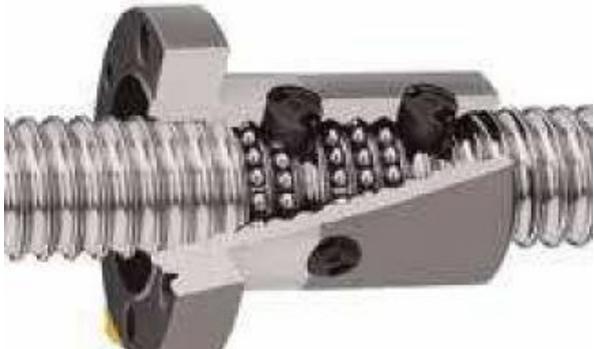
Наименование	Обозначение	Величина
Моменты инерции		
Шкив ведущий	$J_{шк1}$ Нм <sup>2</sup>	$1.01693 \cdot 10^{-3}$
Шкив ведомый	$J_{шк2}$ Нм <sup>2</sup>	$32.152575 \cdot 10^{-3}$
Вал промежуточный	$J_{вал}$ Нм <sup>2</sup>	$782.72 \cdot 10^{-6}$
Винт ходовой	$J_{в}$ Нм <sup>2</sup>	$1401.8258 \cdot 10^{-6}$
Датчик	$J_{дат}$ Нм <sup>2</sup>	$1.96 \cdot 10^{-4}$
Якорь электродвигателя	$J_{я}$ Нм <sup>2</sup>	$31.36 \cdot 10^{-3}$
Суппорт	$J_{суп}$ Нм <sup>2</sup>	$3.83169 \cdot 10^{-5}$
Параметры модели(рис.П2.2.)	$J_1$ Нм <sup>2</sup>	0.0364099
	$J_2$ Нм <sup>2</sup>	$4.257 \cdot 10^{-6}$

Наименование	Обозначение	Величина
<b>КПД</b>		
Подшипники		0.8853
Передача винт-гайка		0.2987
Цилиндрическая винтовая передача		0.8078
Ременная передача		0.97
Общий КПД		0.20721
<b>Жесткость</b>		
Винт ходовой	Нм/рад	3720.732
Приведенная жесткость	Нм/рад	413.4147
Коэффициент вязкого трения		$16719 \cdot 10^{-3}$
Приведенный коэффициент вязкого трения		$2.9688 \cdot 10^{-4}$
<b>Внешние силы</b>		
Устройство нагружения	F, Н	6155
Соппротивление роликов опоры	S,Н	6.615
Общая сила		6161.615
Коэффициент приведения силы	$K_{пр}$	$106.157 \cdot 10^{-6}$
Момент сопротивления	$M_{сопр.}$ Нм	0.650986
Коэффициент редукции	$K_p$	$3.18471 \cdot 10^{-4}$

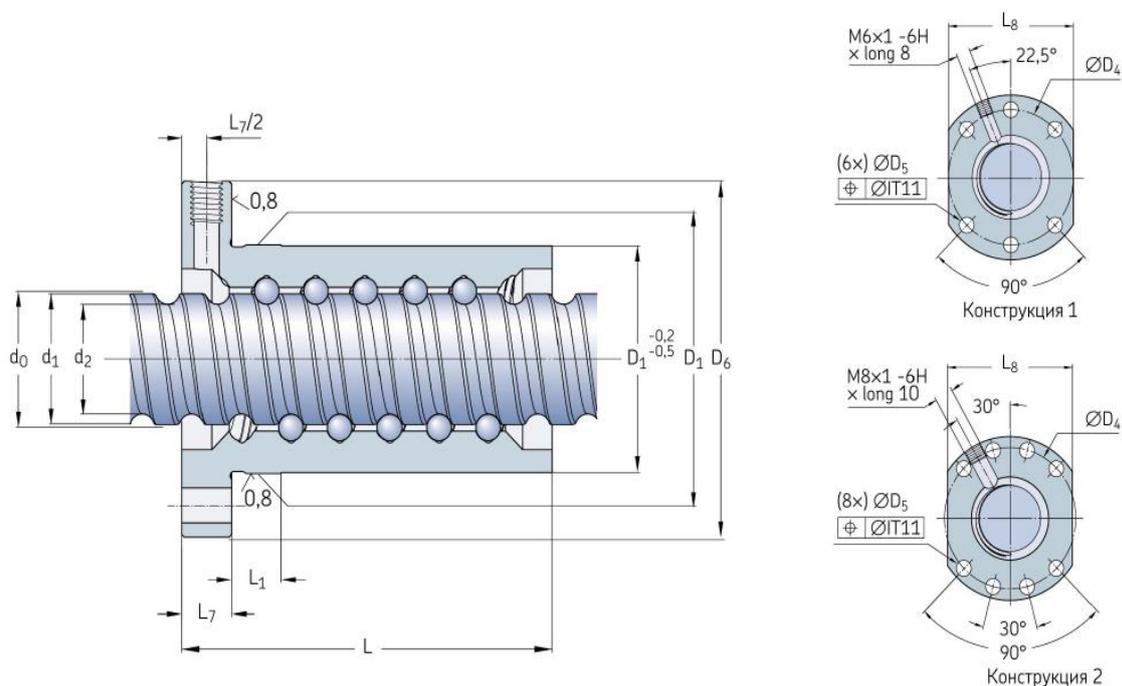
Построение графиков переходного процесса и **АФЧХ** производить с помощью исследовательской программы **MatLab**.

ПЗ. Справочные данные  
Б. Механические узлы  
Б1. Типы рециркуляции шариков

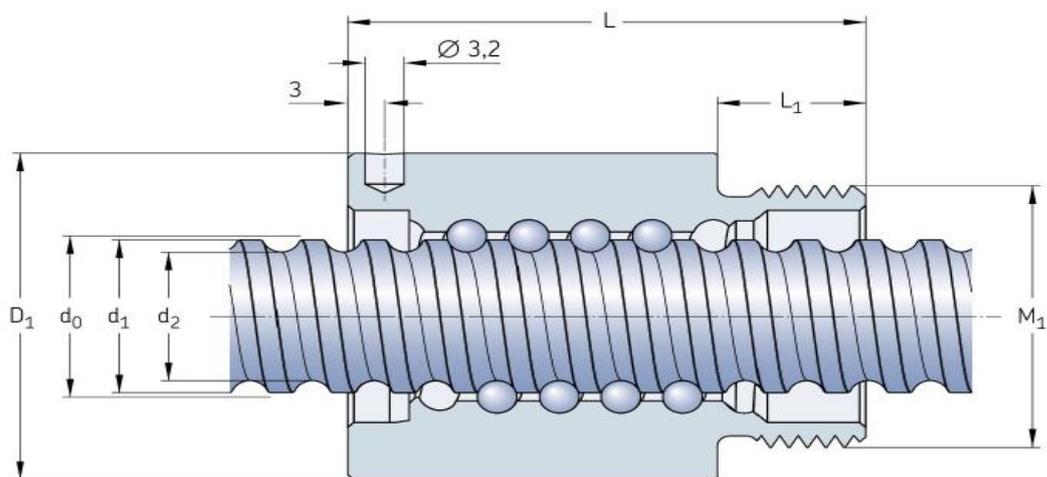
Таблица Б1.1

<p>Внутренняя, при помощи вставок</p> 	<p>Внешняя, при помощи трубчатой системы</p> 
<p>Внутренняя, при помощи вставок</p> 	<p>Внутренняя, при помощи вставок</p> 
<p>Внутренняя, при помощи вставок</p> 	<p>При помощи торцевых граней</p> 

## Б2. Некоторые виды ШВП



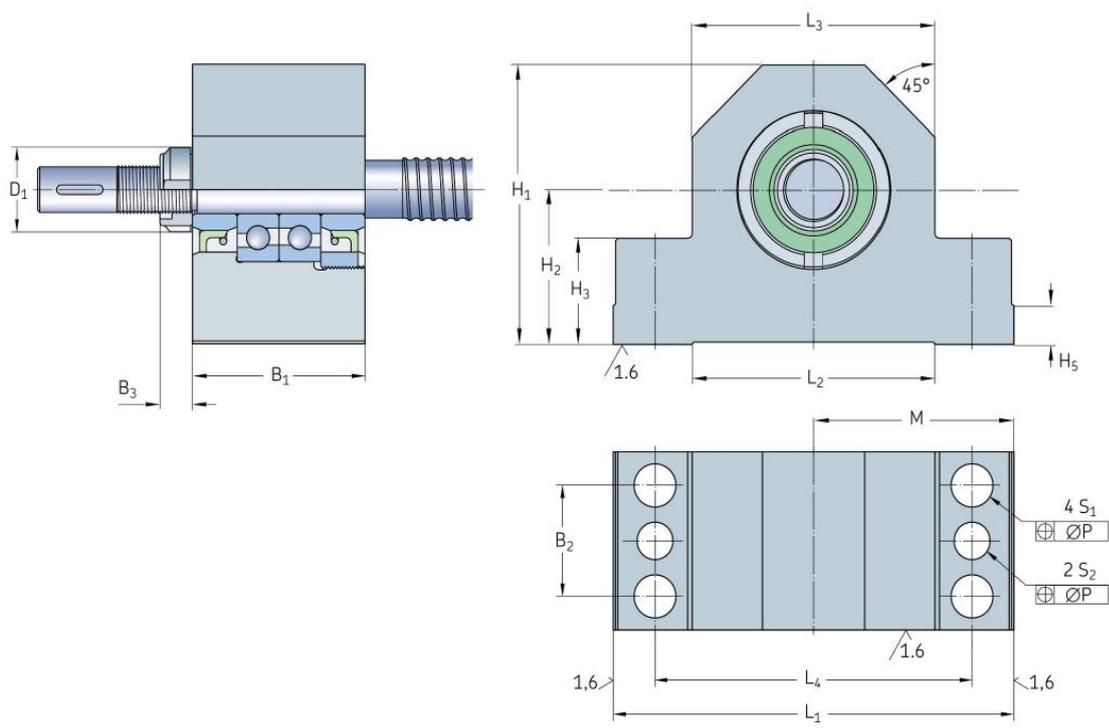
Номинальный диаметр	Величина шага резьбы (правая резьба)	Гайка									Винт			
		Грузоподъемность		Кол-во контуров	Станд, осевой зазор	Уменьшенный-осевой	Преднагн для серии	Инерция	Гребуемый объем смазки	Вес	Масса	Инерция	Гребуемый объем смазки	
		динамическая	статическая											
$d_0$ мм	$P_h$ мм	$C_a$ кН	$C_{0a}$	-	мм	мм	$T_{гр}$ Нм	кгмм <sup>2</sup>	см <sup>3</sup>	кг	кг/м	кгмм <sup>2</sup> /м	см <sup>3</sup> /м	
16	5	7,8	10,7	3	0,08	0,05	0,05	40	0,9	0,17	1,3	33	2,1	
	10	10,7	17,2	2,1,8	0,07	0,03	0,06	41	1,6	□,1 8	1,21	30,7	2,1	
20	5	11,3	17,9	3	0,1	0,05	0,08	B6	1,1	0,24	2	85	2,7	
25	5	12,7	22,7	3	0,1	0,05	0,11	117	1,6	0,29	3,3	224	3,4	
	10	24,1	39	4	0,12	0,08	0,23	144	4,5	0,38	3,2	255	3,2	
32	5	19	41,3	4	0,1	0,05	0,21	364	2,1	0,54	5,6	641	4,5	
	10	21,9	39	3	0,12	0,08	0,25	384	4,6	0,58	5,6	639	4,2	
40	5	25,6	65,6	5	0,1	0,05	0,36	855	3,1	0,92	9	1639	5,6	
	10	63,3	124,1	5	0,12	0,08	0,64	1010	10,7	1,3	8,4	1437	5,1	
50	10	71,3	157,3	5	0,12	0,08	0,88	2130	13,1	1,8	13,6	3736	6,5	
63	10	81,5	206,9	5	0,12	0,08	1,23	4075	16,1	2,4	22	9913	8,4	



Винт d <sub>0</sub> ×P <sub>h</sub>	Гайка						Винт		
	D <sub>1</sub> h <sub>0</sub>	M <sub>1</sub> b <sub>g</sub>	Без грязеъёмни- ка L ±0.3	Сгрязе- съёмни - ком	L <sub>1</sub>	Гаечный ключ (FACOM)	длина макс.	d <sub>2</sub>	d <sub>1</sub>
мм	мм	мм	мм	мм	мм	-	мм	мм	мм
6x2	16.5	M14x1	20		7.6	126-A35	1000	4.7	6
8x2.5	17.5	M15x1	23.5	23.5	7.6	126-A35	1000	6.3	7.6
10x2	19.5	M17x1	22	22	7.5	126-A35	1000	8.3	9.5
12x2	20	M18x1	23.5	23.5	8	126-A35	2000	9.9	11.2
12x4	25.5	M20x1	34	34 40	10	126-A35 126-	2000	9.4	11.3
12.5	23	M20x1	40		10	A35	2000	9.3	11.8
14x4	27	M22x 1.5	34	34	8	126-A35	2000	11.9	13.7
16x2	29.5	M25x1.5	21	21	12	126-A35	2000	14.3	15.5
16x5	32.5	M26x1.5	42	42	12	126-A35	2000	12.7	15.2

### Б3. Опоры

Винт d <sub>0</sub>	Гайка																
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	M js8	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>1</sub> ,	H <sub>±</sub>	H <sub>±j</sub> s8	H <sub>±</sub>	H <sub>±</sub>	H <sub>±</sub>	S <sub>1</sub>	P	S <sub>2</sub> H12
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
16	86	52	52	68	43	37	23	14	28	5S	3?	22	15	8	9	0.15	7.7
20	94	52	60	77	47	42	2S	14	3C	64	34	22	17	B		0.15	7.7
25	103	65	66	B8	5^	M	29	38	37	72	39	21	19	10	13	0.20	9.7
32	112	65	70	92	56	49	29	18	40	77	45	21	20	10	11	0.20	9.7
40	126	82	80	105	63	53	3?	20	49	98	58	32	23	12	13	0.20	9.7
50	344	80	92	118	72	59	35	22	54	112	65	38	25	12	13	0.20	9.7



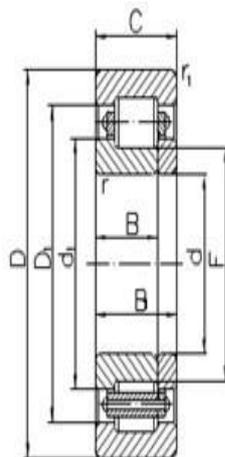
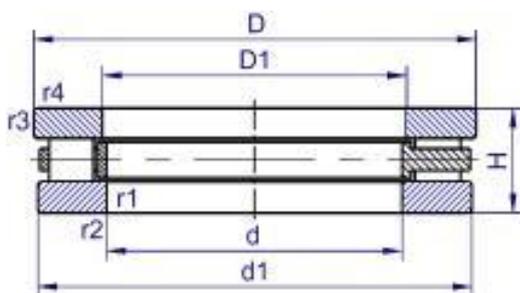
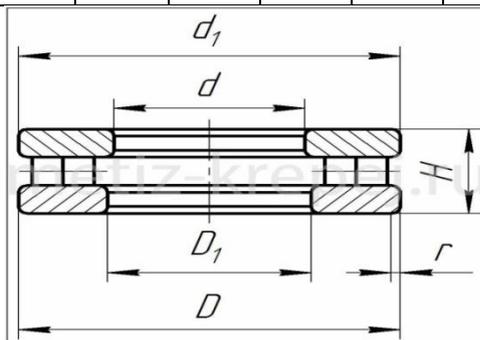
#### Б4. Модули упругости ремней

Профиль ремня	Материал	Модуль упругости (МПа)
Плоский ремень	Прорезиненная ткань	80...120
	Хлопчатобумажная ткань	30...60
	Высокополимерные материалы	2250...3800
Зубчатый ремень	Со стальным кордом	6000...39000
Клиновые ремни	Хлопчатобумажный корд	80...120
	Кордотканевые	250...400
	Шнуровой корд из волокна анид	600...800

## Б5. Подшипники

(ГОСТ 1104 - Л, 12 ГОСТ 23526-79, ГОСТ 8328-75)

Диаметр отверстия dмм	Условные обозначения		Основные размеры, мм						
	Отечеств,	Импортные	d	D	H	d1	h	c	r <sub>max</sub>
80	9116	81116	80	100	19	82	5,73	1,5	3
	9216	81216	80	110	28	82	8,5	1,5	3
	9889316	89316	80	135	36	82	12,5	2,5	4
85	9117	81117	85	110	19	87	5,75	1,5	3
	9217	81217	85	125	31	88	9,5	1,5	3
	9889317	89317	85	150	39	88	13,5	2,5	4
90	9118	81118	90	120	22	92	6,5	1,5	3
	9218	81218	90	135	35	93	10,5	2	4
	9889318	89318	90	155	39	93	13,5	2,5	4
100	9120	81120	100	135	25	102	7	1,5	3
	9220	81220	100	150	38	103	11,5	2	4
	9889320	89320	100	170	42	103	14,5	2,5	4
110	9122	81122	110	145	25	112	7	1,5	3



## Подшипники роликовые комбинированные типа 5040000

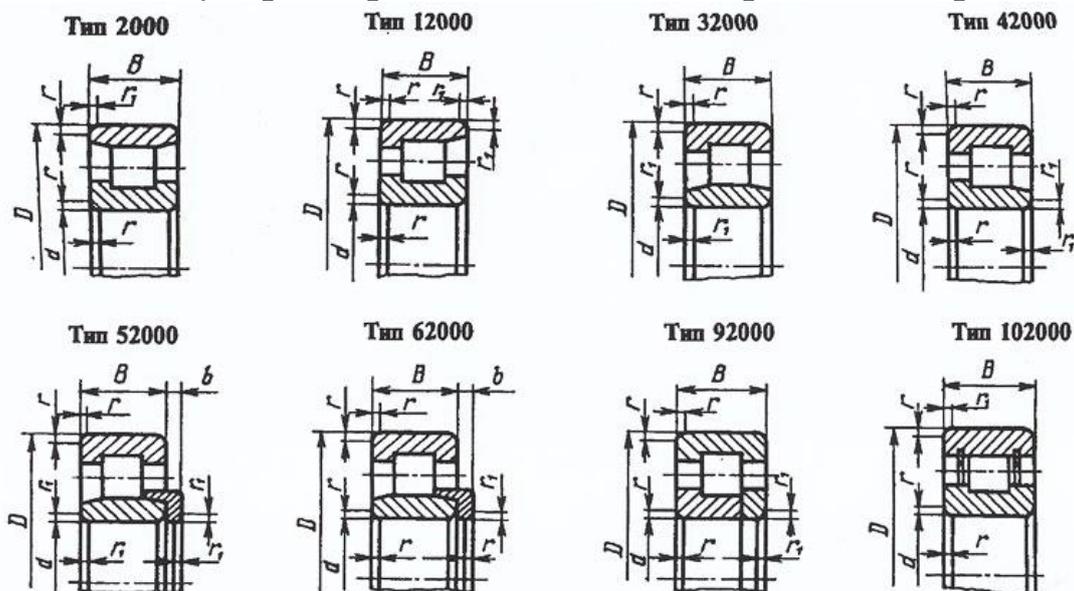
Дмм	Обозначение	Основные размеры, мм							S мкм
		D	d <sub>1</sub>	D <sub>1</sub>	A	B	b	R	
20	4-504704	52	25	42	46	16	5	1	3
	4-504904	62	30	52	60	20	7,5	1,5	4
25	4-504705	57	30	47	50	20	5	1	3
	4-504903	72	35	62	60	20	7,5	1,5	4
30	4-504706	62	35	52	50	20	5	1	5
	4-504906	80	40	68	66	20	9	1,5	5
	4-504907	85	45	73	66	20	9	1,5	5
40	4-504708	75	4)	65	54	20	6	1,5	3
	4-504908	90	M>	7Я	75	25	9	1,5	5
45	4-504709	80	>0	70	60	25	6	1,5	3
	4-504909	105	55	go	82	25	9	1,5	5
50	4-504710	90	«	78	60	25	6	1,5	3
	4-504910	110	60	95	82	25	11	2	5
55	4-504911	115	6)	100	82	25	11	2	5
60	4-504912	120	70	105	82	25	11	2	5
65	4-504913	125	75	110	82	25	11	2	5
70	4-504914	130	80	115	82	25	11	2	5

## Подшипники серии 9000

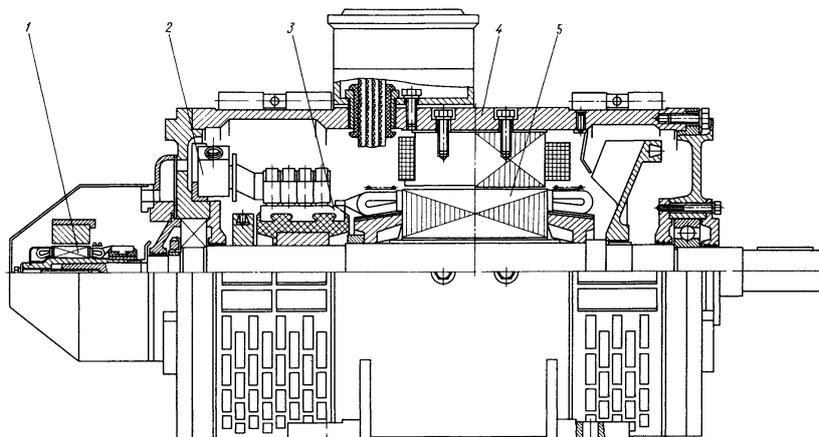
Диаметр отверстия, мм	Условное обозначение		Основные размеры, мм						
	отечественные,	импортные	d	D	H	dl	h	c	r
17	9103	81103	17	10	9	18	2,75	0,5	1
20	9104	81104	20	15	10	21	2,75	0,5	1
25	9105	81105	25	42	11	26	3	4	2
30	9106	81106	30	47	11	12	3	1	2
	9206	81206	30	52	16	12	4,25	1	2
	9889306	89306	30	60	18	12	6,25	1,5	2
35	9107	81107	35	52	12	17	3,5	1	2
	9207	81207	35	62	18	17	5,25	1,5	2
	9889307	89306	35	68	20	17	7	1,5	2
40	9108	81108	40	60	13	42	3,5	1	2
	9208	81208	40	68	19	42	5	1,5	2
	9889308	89308	40	78	22	42	7,5	1,5	2
45	9109	81109	45	65	14	47	4	1	2

Диаметр отверстия $d$ , мм	Условное обозначение		Основные размеры, мм						
	отечественные	импортные	$d$	$D$	$H$	$dl$	$h$	$c$	$r$
50	9110	81210	50	70	14	52	4	1	2
	9210	82210	50	78	22	52	6,5	1,5	3
	9889310	89310	50	95	27	52	9,5	2	4
55	9111	81111	55	78	16	57	5	1	2
	9211	81211	55	90	25	57	7	1,5	3
	9889311	89311	55	105	JO	57	10,5	2	4
60	9112	81122	60	85	17	62	4,7	1,5	2
	9212	81212	60	95	26	62	7,5	1,5	3
	9889312	89312	60	110	30	62	10,5	2	4
65	9113	81113	65	90	18	67	5,25	1,5	3
	9213	81213	65	100	27	67	8	1,5	3
	9889313	89313	65:	115	30	67	10,5	2	4
70	9114	81114	70	95	18	72	5,25	1,5	3
	9214	81214	70	105	27	72	8	1,5	3
	9889314	89314	70	125	34	72	12,5	2	4
75	9113	81115	75	100	19	77	5,75	1,5	3
	9213	81215	75	110	27	77	8	1,5	3
	9889315	89315	75	135	36	77	12,5	2,5	4

**Подшипники упорные роликовые с цилиндрическими роликами**



## В. Двигатели



*Рис. В1 Двигатель постоянного тока серии 2П*

*1 – тахогенератор, 2 – траверса, 3 – коллектор, 4 – станина, 5 – якорь, 6 – главный полюс, 7 – добавочный полюс, 8 – щетки*

**Таблица В1**

### Технические данные двигателей типа 4ПО и 4ПБ

Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт, при исполнении		Напряжение, В	Ток якоря, А, при исполнении		Номинальная частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин
	УХЛ4	04		УХЛ4	04		
4ПБ112М1	0,5	0,5	110 220	8 3,9	7,2 3,5	750	2500 2000
	0,75	0,675	110 220	10,5 5	9,5 4,5	1000	3000 2500
	1,1	1	110 220	14 6,7	12,6 6	1500	4000
	1,5	1,35	ПО 220	18,3 9,1	16,5 8,2	2200	4000
	2,2	2	110 220	25,6 12,5	23 11,3	3000	4000
4ПБ112М2	1	0,9	110 220	13 6,4	11,7 5,8	1000	2500
	1,5	1,35	110 220	17,6 8,8	15,8 7,9	1500	4000
	2,2	2	110	25,3	22,8	2200	4000

продолжение табл.В1

Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт, при исполнении		Напряжение, В	Ток якоря, А, при исполнении		Номинальная частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин
	УХЛ4	04		УХЛ4	04		
4ПО80А1	0,18	0,16	110-220	3,5 1,6	3,2 1,3	1000	2000
	0,25	0,225	110-220	4,1 1,7	3,6 1,5	1500	3000
	0,55	0,5	110-220	7,9 3,8	7,1 3,4	3000	4000
4ПО80А2	0,25	0,225	110-220	4,0 1,8	3,6 1,6	1000	2000
	0,37	0,33	110-220	5,8 2,1	5,2 1,9	1500	4000
	0,55	0,5	110-220	8,0 3,5	7,2 2,2	2200	4000
	0,75	0,67	110-220	10,7 4,9	9,6 4,4	3000	4000
4ПО80В1	0,37	0,33	110-220	4,8 2,4	4,3 2,1	1000	4000 2000
	0,55	0,5	50	14,5	13	1500	4000 4000
			75	10,2	9,2		
			110	7,7	6,9		
			220	3	2,9		
0,75	0,675	110-220	10,2 5	9,2 4,5	2200	4000	
1,1	1	50	31,2	28,1	3000	4000	
		75	21,1	19,9			
		110	15,2	13,7			
		220	7,1	6,4			
4ПО100S1	0,37	0,33	110-220	5,7 2,7	5,1 2,4	750	3000 3500
	0,55	0,5	110	8,4	7,6	1000	4000 2000
			220	3,9	3,5		
	0,75	0,67	110-220	10,4 5,1	9,4 4,6	1500	4000
	1,1	1	110	14 6,7	12,6	2200	4000
220			6,1	6,1			
1,5	1,35	110-220	20 9,7	18 8,7	3000	4000 4000	

Продолжение табл. В1

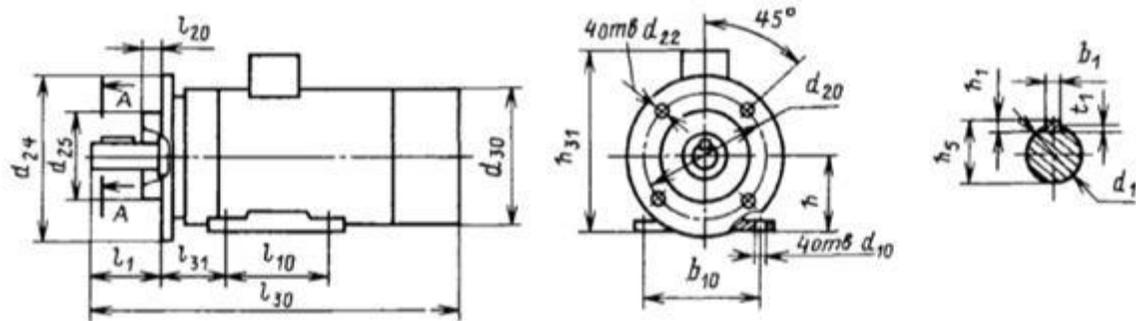
Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт, при исполнении		Напря- жение, В	Ток якоря, А, при исполне- нии		Номинальная частота враще- ния, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин
	УХЛ4	04		УХ Л 4	04		
4ПБ80А2	0,18	0,16	110 220	2,9 1,3	2,6 1,1	1000	4000 2500
	0,25	0,225	110 220	3,7 1,6	3,3 1,5	1500	4000
	0,37	0,33	110 220	5,0 2,4	4,5 2,2	2200	4000
	0,55	0,5	110 220	8,1 3,8	7,2 3,4	3000	4000
4ПБ80В1	0,25	0,225	110 220	3,8 1,8	3,4 1,6	1000	4000 2500
	0,37	0,33	110 220	5,1 2,4	4,6 2,1	1500	4000
	0,55	0,5	ПО 220	7,3 3,5	6,6 3,2	2200	4000
	0,75	0,675	110 220	9,3 4,5	8,4 4	3000	4000
4ПБ100S1	0,25	0,225	110 220	4,2 1,9	3,8 1,7	750	3000 2000
	0,4	0,36	110 220	6,1 2,8	5,5 2,5	1000	4000 2500
	0,55	0,5	110 220	7,7 3,6	6,9 3,2	1500	4000
	0,75	0,675	110 220	9,6 4,6	8,6 4,1	2200	4000
	1,1	1	110 220	13,9 6,7	12,5 6	3000	4000
4ПБ100S2	0,37	0,33	110 220	5,4 2,6	4,9 2,3	750	3000 2000
	0,5	0,45	110 220	7 3,3	6,3 3	1000	4000
	0,75	0,675	110 220	9,3 4,5	8,4 4,0	1500	4000
	1,1	1	110 220	13,3 6,5	12 5,8	2200	4000
4ПБ100L1	1,5	1,35	110 220	17,8 8,7	16 7,8	3000	4000
4ПБ100L1	0,4	0,405	110 220	6 3,1	5,4 2,8	750	3000 2000
	0,6	0,54	110 220	8 3,8	7,2 3,4	1000	4000 2500
	0,9	0,81	110 220	10,6 5,2	9,5 4,7	1500 1500	4000

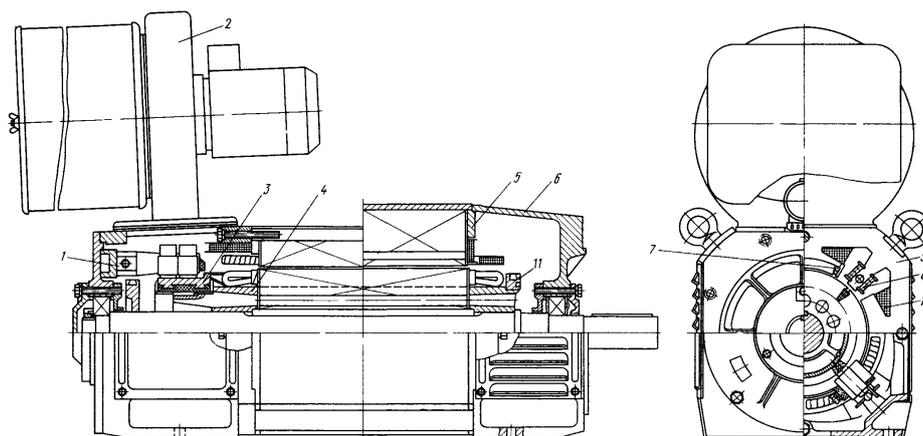
Продолжение табл.В1

Типоразмер двигателя	Номинальная мощность, кВт, при исполнении		Напряжение, В	Ток якоря, А, при исполнении		Номинальная частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин
	УХЛ4	04		УХЛ4	04		
4ПО100S2	0,55	0,5	110 220	8,6 3,8	7,7 3,4	750	3000 1500
	0,75	0,675	110 220	10,4 4,8	9,4 4,3	1000	4000 2000
	0,55	0,5	75	11,9	10,7	1000	-
	1,1	1	110 220	13,8 6,1	12,4 5,5	1500	4000
	1,5	1,35	110 220	19,3 9,5	17,3 8,6	2200	4000
	2,2	2	110 220	26,2 13,4	23,6 12	3000	4000
4ПО100L1	0,75	0,675	110 220	11 5,2	9,9 4,7	750	3000 1500
	1,1	1	110 220	15,4 7,2	13,9 6,5	1000	4000 2000
	1,5	1,35	110 220	19 9,3	17,2 8,4	1500	4000
	2,2	2	ПО 220	28 13,9	25,4 12,5	2200	4000
	3	2,7	110 220	37,2 18,4	33,7 16,6	3000	4000
4ПО112M1	1,5	1,35	110 220	19 9	17,3 8,4	1000	2000
	2,2	2,0	110 220	26 12,8	23,6 11,5	1500	3000
	3	2,7	110 220	34,7 17	31,2 15,3	2200	4000
	4	3,6	110 220	44,8 22	40,3 19,8	3000	4000
4ПО112M2	1,5	1,35	110 220	19,1 9,6	18 8,6	750	1500
	2,2	2	110 220	27,9 13,6	25 12,2	1000	2000
	3	2,7	110 220	33,8 16,6	30,4 15	1500	3000
	4	3,6	110 220	45 22	40 20	2200	4000
	5,5	5	110 220	60 30	54 27	3000	4000

**Таблица В2 Габаритные, установочные и присоединительные размеры двигателей типа 4ПО**

Двигатель	Размеры, мм																	Момент инерции, $10^{-2}$ кгм <sup>2</sup>	Масса, кг
	l <sub>1</sub>	l <sub>10</sub>	l <sub>30</sub>	l <sub>31</sub>	b <sub>1</sub>	b <sub>10</sub>	h	h <sub>1</sub>	h <sub>5</sub>	h <sub>31</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>10</sub>	d <sub>30</sub>	d <sub>20</sub>	d <sub>22</sub>	d <sub>24</sub>	d <sub>25</sub>		
4 П 80S	50	100	325	50	6	125	80	6	24.5	214	22	10	176	130	M8	160	110	1.7	16
4П80M			385															2.7	18
4 П 80L			445															3A	20
4 П 100S	50	112	497	63	8	160	100	7	31	256	24	12	225	165	M10	200	130	5.4	36
4П100M		112	497															8.1	38
4 П 100L		140	527															10.4	40
4П112M	60	140	530	70	8	190	112	7	31	296	28	12	250	265	15	300	230	14,0	58
4П112L		140	530															18.0	60





*Рис. В3 Двигатель постоянного тока серии 4П  
с высотой оси вращения 180 мм типа 4ПФ*

*1 – траверса, 2 – вентилятор с независимым приводом, 3– коллектор, 4 – обмоткодержатель, 5 – нажимная плита, 6 – подшипниковый щит, 7 – обмотка компенсационная, 8 – дополнительный полюс, 9 – статор, 10 – обмотка параллельного возбуждения; 11 – балансировочное кольцо*

**Таблица В3 Технические данные двигателей типа 4ПФ**

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток якоря, А	кпд, %	Номинальная частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин
4ПФ112S	4	220	24	72,3	900	
	3,15		19,8	69,3	750	
	2		14,5	57,6	450	
4ПФ112M	4,25		26,4	68	730	5000
	3		20,1	60,3	475	
4ПФП2L	3,55		24,5	60,1	425	
4ПФ132S	15		85,4	77,9	1400	
	7,5		43,6	76	1000	
	6		32,7	74	875	
	4,25		26,9	65	580	
4ПФ132M	11		61,5	78,5	1060	4500
	8,5		48,6	76	875	
	8		47,3	68	600	

Продолжение табл. В3

4ПФ132L	11 8,5		62,8 54,4	76 68	800 515	
4ПФ160S	15 11		79,6 66,2	80,7 70,5	850 530	4000
4ПФ160M	15		85,6	75,3	580	
4ПФ180	17		99,4	73	500	3800
4ПФ180M	20		114,5	75	475	
4ПФП112S	7,5	440	19,2	87,1	2120	
	5,5		14,9	81,4	1450	
	4,25		12,6	74	975	
	3,14		9,9	69	730	
4ПФ112M	7,5		19,6	82,5	1450	5000
	5,5		16,6	74,1	900	
	4,25		13,3	67,4	690	
4ПФП2L	10		26,3	81,2	1320	
	7,5		21,5	81	975	
	5,5		17	70,8	690	
4ПФ132S	30		76,7	87,1	3070	
	18,5		47,8	85	2180	
	15		41,7	80	1400	
	5,5		15,7	73	800	

**Таблица В4. Технические данные двигателей серии 2П  
с высотами оси вращения 90-200мм**

Тип 2ПН90ЛМУХЛ4, 2ПН90ЛГУХЛ4								
0,2	110	750	3000	54 54,5	4,51	2,99 1	555	106
	220	800	1500		17,5	3,13	145	430
0,34	110	1060 1000	4000	60 60	2,85	1,731	555	64,5
	220		2000		12,2	7,96	145	264
0,55	110	1500 1500	4000	67,5	1,3	0,932	432	33
	220		300	67,5	5,44	3,89	112	132
0,9	110	2000	4000	73 73	0,644	0,4	340	14,6
	220	2120	4000		2,85	1,731	87	64
1,3	110	3150 3150	4000	76	0,355	0,257	340	8,2
	220		4000	78	1,3	0,932	87	33
Тип 2ПБ90МУХЛ4, 2ПБ90МГУХЛ4								
0,13	110	800	3000	49,5	7,48	4,79	810	173
	220	750	1500	47,5	34,0	20,37	222	694

Продолжение табл.В4

0,18	110 220	1000 1000	4000 2000	54,5 55,5	5,41 21,77	3,47 13,31	810 222	122 490
0,28	110 220	1600 1500	4000 3000	63,5 63,5	2,69 11,7	1,85 7,35	810 222	62 267
0,4	110 220	2360 2200	4000 4000	69,5 58,5	1,46 6,84	0,87 4,40	810 222	34 147
0,55	110 220	3000 3000	4000 4000	71,0 71,0	1 3,99	0,58 2,55	810 222	21 82
Тип 2ПБ90ЛУХЛ4, 2ПБ90ЛХУХЛ4								
0,18	110 220	750 750	3000 1500	53 53	5,44 23,55	3,89 15	720 192	150 610
0,25	110 220	1000 1120	4000 2000	58,5 61,5	4,01 1 3,25	2,3 8,65	720 192	96 360
0,37	110 220	1500 1500	4000 3000	66 67,5	2,1 7,74	1,297 5,17	720 192	54 199
0,53	110 220	2200 2240	4000 4000	72 73	1,13 4,26	0,687 2,84	720 192	28 108
0,75	110 220	3000 3150	4000 4000	78,5 77	0,644 2,28	0,4 1,609	720 192	17 63
Тип 2ПН100МУХЛ4, 2ПН100МГУХЛ4								
0,37	110 220	750 750	3000 1500	60 59,5	2,69 11,78	1,62 6,7	470 120	89 343
0,5	110 220	1000 1000	4000 2000	65 66	1,79 7,05	0,93 4,62	470 120	53 222
0,75	110 220	1500 1500	4000 4300	71 71,5	0,805 3,4	0,57 2,05	359 103	26 104
1-2	110 220	2120 2200	4000 4000	75 76,5	0,436 1,792	0,355 0,93	359 103	14 53
2	11 220	3000 3000	4000 4000	78,5 79	0,201 0,805	0,135 0,57	265 73	6,6 26
Тип 2ПН100ЛУХЛ4, 2ПН100ЛХУХЛ4								
0,42	110 220	750 750	3000 1500	60,5 61,5	2,05 7,87	1,28 6,2	397 114	71 286
0,63	11 220	1000 1060	4000 2000	67 67	1,17 4,92	0,853 3,52	397 114	42,3 169
1,1	110 220	1500 1500	4000 4300	72,5 74	0,52 2,2	0,51 1,57	295 81	21 83
1,7	110 220	2200 2200	4000 4000	77 78	0,294 1,17	0,235 0,853	295 81	10,6 42

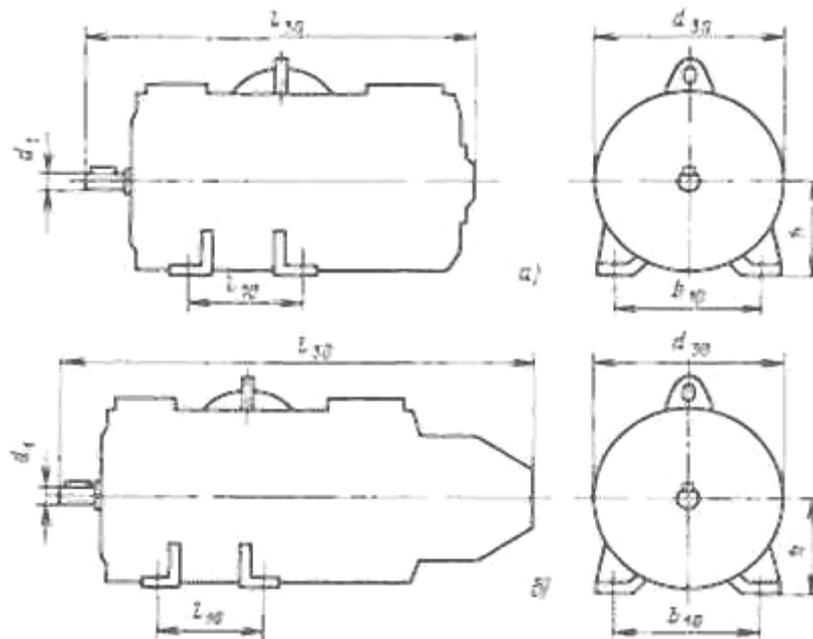
Типоразмер машины	Размеры, мм						Масса, кг при исполнении		Момент инерции, кг*м <sup>2</sup>
	b <sub>10</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>20</sub>	d <sub>30</sub>	L <sub>10-</sub>	L <sub>30</sub>	IM100I	IM360I	
2ПН100М 2ПБ100М	160	22	130	220	140	414	36	40	0,011
2ПН100МГ 2ПБ100МГ						538	41	45	
2Ф1Н100L 2ПН'00 LG						434	39	43	0,012
						558	44	48	
2ПН112М	190	24	165	237	159	490	47	51	0,015
2ПБ112М				218					
2ПНП2МГ				237		640	52	56	
2ПБ112МГ				218					
2ПН112L				237		530	56	60	0,018
2ПБ112L				218					
2ПН112 L Г				237		680	61	65	
2ПБ112 LG				218					
2ПН132М	216	38	215	277	162	610	86	95	0,038
2ПБ132М				258					
2ПН132МГ				277		760	91	100	
2ПБ132МГ				258					
2ПН132 L				277		650	96	105	0,048
2ПБ132 L				258					
2ПН132 L Г				277		805	101	110	
2ПБ132 LG				258					
2ПН160М	2S4	38	265	333	149	645	141	146	0,083
2ПБ160М				314					
2ПН160МГ				333		800	147	152	0,083
2ПБ160МГ				314					

Продолжение табл.В4

2ПН1601 L				333		695	159	164	0,1
2ПБ160 L				314					
2ПН160 ЛГ				333		850	165	170	
2ПБ1601 L Г				314					

**Таблица В5. Габаритные, установочные и присоединительные размеры машин типов 2ПН и 2ПБ с высотами вращения 90 – 200 мм**

Типоразмер машины	Размеры, мм						Масса, кг при исполнении		Момент инерции, кг*м <sup>2</sup>	
	b <sub>10</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>20</sub>	d <sub>30</sub>	L <sub>10-</sub>	L <sub>30</sub>	IM100I	IM160I		
2ПН90М 2ПБ90М	140	16	130	196	125	49	24	27	0,004	
2ПН90МГ 2ПБ90МГ						493	29	32		
2ПН90L 2ПБ90L						349	27	30		0,005
2ПН90ЛГ 2ПБ90ЛГ						518	32	35		





**Таблица В6. Технические данные двигателей серии П**

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин		кпд, %	Момент инерции, кг м <sup>2</sup>
			номинальная	максимальная		
П-11У4	0,13	110	1000	2000	53,7	0,0031
	0,13	220	1000	2000	53,7	
	0,3	110	1500	3000	63,5	
	0,3	220	1500	3000	66	
	0,45	110	2200	3300	67	
	0,45	220	2200	3000	67	
	0,7	110	3000	3450	73	
	0,7	220	3000	3450	73	
П-12У4	0,2	110	1000	2000	64	0,0037
	0,2	220	1000	2000	62,5	
	0,45	110	1500	3000	69	
	0,45	220	1500	3000	70	
	0,7	110	2200	3300	73	
	0,7	220	2200	3000	73	
	1	110	3000	3450	77	
	1	220	3000	3450	77	
П-21У4	0,2	110	750	1500	60,7	0,005
	0,2	220	750	1500	60,7	
	0,3	110	1000	2000	65	
	0,3	220	1000	2000	62	
	0,7	110	1500	3000	71,6	
	0,7	220	1500	3000	72	
	1	110	2200	3300	73	
	1	220	2200	3300	74	
	1,5	110	3000	3450	76,5	
	1,5	220	3000	3450	77	
П-22У4	0,3	110	750	1500	66,5	0,013
	0,3	220	750	1500	68	
	0,45	110	1000	2000	70,5	
	0,45	220	1000	2000	70,5	
	1	110	1500	3000	77,5	
	1	220	1500	3000	76,7	
	1,5	110	2200	3300	77	
	1,5	220	2200	3300	77	
	2,2	110	3000	3000	80	
	2,2	220	3000	3000	82	
П-31У4	0,7	110	1000	2000	72	0,022
	0,7	220	1000	2000	70	
	1,5	ПО	1500	3000	76,5	
	1,5	220	1500	3000	79	
	2,2	110	2200	3300	81	
	2,2	220	2200	3000	81	
	3,2	110	3000	3000	82,5	
	3,2	220	3000	3000	82,5	

Продолжение табл. В6

П-32У4	0,7	110	750	1500	75	0,029
	0,7	220	750	1500	75,5	
	1	110	1000	2000	77	
	1	220	1000	2000	75,5	
	2,2	110	1500	3000	81,5	
	2,2	220	1500	3000	82	
	3,2	110	2200	3000	83,5	
	3,2	220	2200	3000	83	
	4,5	110	3000	3000	84,5	
	4,5	220	3000	3000	85	
П-41У4	1	ПО	750	1500	68,5	0,037
	1	220	750	1500	68,5	
	1,5	ПО	1000	2000	73,5	
	1,5	220	1000	2000	72,5	
	1-5	440	1000	1500	71	
	2,75	440	1500	2250	80,4	
	3,2	ПО	1500	3000	77,5	
	3,2	220	1500	3000	78,5	
	4,2	ПО	2200	3000	81,5	
	4,2	220	2200	3000	81,5	
	6	ПО	3000	3000	81	
	6	220	3000	3000	82	
П-42У4	1,4	440	750	1100	74	0,045
	1,5	110	750	1500	73	
	1,5	220	750	1500	71,5	
	2	440	1000	1500	77	
	2,2	110	1000	2000	76	
	2,2	220	1000	2000	77	
	3,5	440	1500	2250	81,5	
	3,8	110	1500	3000	80	
	3,8	220	1500	3000	80,5	
	5,3	110	2200	3000	82	
	5,3	220	2200	3000	82	
	7,4	110	3000	3000	85	
	7,4	220	3000	3000	84,5	
	П-51У4	2,2	ПО	750	1500	
2,2		220	750	1500	73,5	
2,2		440	750	1100	77,5	
3,2		ПО	1000	2000	78	
3,2		220	1000	2000	79	
3,2		440	1000	1500	77,5	
6		ПО	1500	2250	81	
6		220	1500	2250	81,5	
6		440	1500	2000	81	
8		ПО	2200	2500	83,5	
8		220	2200	2500	84	
11		220	3000	3000	85,5	

Продолжение табл. В6

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин		Кпд, %	Момент инерции, кг м <sup>2</sup>
			номинальная	максимальная		
ПБ-11У2	0,15	110	1500	2000	68	0,0031
	0,15	220	1500	2000	68	
	0,22	110	2200	2600	70	
	0,22	220	2200	2600	70	
	0,33	110	3000	3000 3	78,5	
	0,33	220	3000	000	78,5	
ПБ-12У2	0,23	110	1500	2000	69,5	0,0037
	0,23	220	1500	2000	70	
	0,34	110	2200	2600	72	
	0,34	220	2200	2600	72	
	0,52	110	3000	3000	80,7	
	0,52	220	3000	3000	78,5	
ПБ-21У2	0,35	110	1500	2000	70,5	0,0105
	0,35	220	1500	2000	72	
	0,52	110	2200	2600	73	
	0,52	220	2200	2600	73	
	0,8	110	3000	3000	78	
	0,8	220	3000	3000	79	
ПБ-22У2	0,5	110	1500	2000	75,5	0,013
	0,5	220	1500	2000	75,5	
	0,72	110	2200	2600	75	
	0,72	220	2200	2600	75	
ПБ-31У2	0,65	110	1500	2000	79,5	0,022
	0,65	220	1500	2000	79,5	
	0,95	110	2200	2600	78	
	0,95	220	2200	2600	78	
	1-3	110	3000	3000	84	
	1-3	220	3000	3000	84	
ПБ-32У2	1	110	1500	2000	82,5	0,029
	1	220	1500	2000	82,5	
	1,45	110	2200	2600	80	
	1,45	220	2200	2600	80	
	1,9	110	3000	3000	86	
	1,9	220	3000	3000	86	

Продолжение табл. В6

ПБ-52У2	1,5	110	1000	1400	80	0,1
	1,5	220	1000	1400	81	
	1,5	440	1000	1150	77	
	2,4	110	1500	2000	83,5	
	2,4	220	1500	2000	83	
	2,4	440	1500	1650	83	
	3,5	110	2200	2600	85	
	3,5	220	2200	2600	85	
ПБ-61У2	1,8	110	1000	1400	81,5	0,14
	1,8	220	1000	1400	81,5	
	1,8	340	1000	1150	79	
	3,2	110	1500	2000	81,5	
	3,2	220	1500	2000	85,5	
	3,2	340	1500	1650	84	
ПБ-62У2	2,2	110	1000	1400	84	0,16
	2,2	220	1000	1400	84	
	2,2	440	1000	1150	80	
	4	110	1500	2000	85,5	
	4	220	1500	2000	85,5	
	4	440	1500	1650	84	
ПБ-71У2	3	110	1000	1400	80	0,35
	3	220	1000	1400	80	
	3	440	1000	1150	80	
	6	110	1500	2000	84	
	6	220	1500	2000	84	
	6	440	1500	1650	85	
ПБ-72У2	4	ПО	1000	1400	81	0,4
	4	220	1000	1400	81	
	4	440	1000	1150	81	
	7,7	ПО	1500	2000	85	
	7,7	220	1500	2000	85	
	7,7	440	1500	1650	85	
	7,7	440	1500	1650	85	
ПБ-81У2	5	110	1000	1000	80	0,7
	5	220	1000	1000	80	
	6,5	110	1500	1500	81	
	6,5	220	1500	1500	81	
ПБ-82У2	6,6	ПО	1000	1000	81	0,8
	6,6	220	1000	1000	81	
	10	220	1500	1500	84	

**Таблица В7. Габаритные, установочные и присоединительные размеры машин серии П и ПБ**

Типоразмер машины	Размеры, мм							Масса, кг	
	$b_{10}$	$d_1$	$d_{20}$	$d_{30}$	$L_{10}$	$L_{30}$	$h$	IM2101, IM2102, IM3601, IM2103, IM2104, 1M361I, 1M363I	
П-41У4, ПБ-41У2	240	30	215	304	195	546 576	160	83 87	78 82
П-42У4, ПБ-42У2	240	30	215	304	225	576 606	160	93 97	88 92
П-51У4, ПБ-51У2	264	35	255	352	225	606 638	180	122 127	115 120
П-52У4, ПБ-52У2	264	35	255	352	265	646 678	180	142 147	135 140
П-61У4, ПБ-61У2	300	40	300	411	265	634 664	225	173 178	165 170
П-62У4, ПБ-62У2	300	40	300	411	300	669 699	225	190 198	182 190

**Таблица В7.1 Габаритные, установочные и присоединительные размеры машин серии П и ПБ 4-6-го габаритов**

Типоразмер машины	Размеры, мм						Масса, кг, при исполнении IM100I, IM1004
	$b_{10}$	$d_1$	$d_{20}$	$L_{10}$	$L_{30}$	$h$	
П-41У4, ПБ-41У2	240	30	304	195	546 576	160	78 82
П-42У4, ПБ-42У2	240	30	304	225	576 606	160	88 92
П-51У4, ПБ-52У2	264	35	352	225	606 638	180	115 120
П-52У4, ПБ-52У2	264	35	352	265	646 678	180	135 140
П-61У4, ПБ-61У2	300	40	411	265	634 664	225	165 170
П-62У4, ПБ-62У2	300	40	411	300	669 699	225	182 190

**Таблица В8. Технические данные двигателей серии ПБС и ПБСТ**

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт		Напряже- ние, В	Частота об/мин		кпд, %
	номи- нальная	макси- мальная		номи- нальная	макси- мальная	
ПБС-22МУХЛ4	0,4	0,56	110	1000	2500	70
ПБСТ-22МУХЛ4	0,4	0,56	220	1000	2500	70,5
	0,6	0,8	110	1500	3750	74
	0,6	0,8	220	1500	3750	76
	0,85	1,2	110	2200	4000	78
	0,85	1,2	220	2200	4000	77
	I	1,4	110	3000	4000	79,5
	1	1,4	220	3000	4000	78,5
ПБС-23МУХЛ4	0,55	0,77	110	1000	2500	71
ПБСТ-23МУХЛ4	0,55	0,77	220	1000	2500	70
	0,85	1,2	110	1500	3750	80,5
	0,85	1,2	220	1500	3750	77
	1-15	1,6	110	2200	4000	80,5
	1,15	1,6	220	2200	4000	80
	1,3	1-8	110	3000	4000	80
	1,3	1,8	220	3000	4000	80
ПБС-32МУХЛ4	0,8	1,1	110	1000	2500	75
ПБСТ-32МУХЛ4	0,8	1,1	220	1000	2500	75
	1,2	1,7	110	1500	3750	79,5
	2	1,7	220	1500	3750	80
	1,5	2,1	110	2200	4000	82,5
	1,5	2,1	220	2200	4000	82
	1,75	2,4	220	3000	4000	81,5
ПБС-33МУХЛ4	1	1,4	110	1000	2500	79
ПБСТ-33МУХЛ4	1	1,4	220	1000	2500	79
	1,6	2,2	110	1500	3750	82,4
	1,6	2,2	110	1500	3750	82,4
	1,6	2,2	220	1500	4000	82
	2,10	2,9	220	2200	4000	85
ПБС-42МУХЛ4	1,4	2	110	1000	2500	79
ПБСТ-42МУХЛ4	1,4	2	220	1000	3000	78
	2,1	2,9	110	1500	3750	84,5
	2,1	2,9	220	1500	3750	83,5
	2,1	2,9	440	1500		83,5
	2,9	4	220	2200	4000	86,5
	2,9	4	440	2200		86,5
	3,4	4,8	220	3000	4000	86,5
	3,4	4,8	440	3000		86,5

Продолжение табл.В8

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт		Напряже- ние, В	Частота вращения , об/мин		кпд, %
	номи- нальная	макси- мальная		номи- нальная	макси- мальная	
ПБС-52МУХЛ4 ПБСТ-52МУХЛ4	2,5	3,8	220	1000	3000	83
	2,5	3,8	440	1000	—	81,5
	4,2	6,2	220	1500	3600	87
	4,5	6,2	440	1500	—	87
	5,5	8,3	220	2200	3600	88,5
	5,5	8,3	440	2200	—	89
	6,5	9,8	220	3000	3600	88,5
	6,5	9,8	440	3000	—	89
ПБС-53МУХЛ4 ПБСТ-53МУХЛ4	3,3	5	220	1000	3000	86,5
	3,3	5	440	1000	—	86,5
	4,8	7,2	220	1500	3600	88
	6,3	9,4	440	2200	—	90
	8	12	220	3000	3600	91
	8	12	440	3000	—	91
ПБС-62МУХЛ4 ПБСТ-62МУХЛ4	4,7	7	220	1000	3000	87
	4,7	7	440	1000	—	87
	7,2	10,8	220	1500	3600	90
	7,2	10,8	440	1500	—	90
	10	15	220	2200	3600	90
	11,3	17	220	3000	3600	91
	ПБС-63МУХЛ4	5,4	8	220	1000	3000
5,4		8	440	1000	—	88
7,8		11,7	220	1500	3600	91
7,8		11,7	440	1500	—	91
11		16,5	220	2200	3600	91,5
ПБС-22М04 ПБСТ-22М04		0,36	0,5	110	1000	2500
	0,36	0,5	220	1000	2500	70,5
	0,54	0,72	110	1500	3750	74
	0,54	0,72	220	1500	3750	76
	0,76	1,04	110	2200	4000	78
	0,76	1,04	220	2200	4000	77
	ПБС-23М04 ПБСТ-23М04	0,5	0,7	110	1000	2500
0,5		0,7	220	1000	2500	70
0,76		1,08	110	1500	3750	80,5
0,76		1,08	220	1500	3750	77
1		1,44	110	2200	4000	80,5
1,15		1,63	110	3000	4000	80
ПБС-32М04 ПБСТ-32М04		0,72	1	110	1000	2500
	0,72	1	220	1000	2500	75
	1,05	1,53	110	1500	3750	79,5

**Таблица В9. Габаритные, установочные и присоединительные размеры двигателей серии ПБС (ПБСТ)**

Типоразмер двигателя	Размеры, мм						Масса, кг	Момент инерции, кг м <sup>2</sup>	
	b <sub>10</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>20</sub>	d <sub>30</sub>	L <sub>10</sub>	L <sub>30</sub>			h
Исполнение IM1001									
ПБС-22М	200	22	250		205	458	140	52	0,011
ПБС-23М	200	22	—	250	235	488	140	60	0,012
ПБС-32М	225	28	—	284	260	528	150	78	0,024
ПБС-33М	225	28	—	284	310	578	150	90	0,031
ПБС-42М	240	30	—	304	225	564	160	93	0,045
ПБС-43М	240	30	—	304	270	609	160	109	0,056
ПБС-52М	264	36	—	350	265	627	180	140	0,109
ПБС-53М	264	36	—	350	315	677	180	159	0,129
ПБС-62М	300	40	—	410	300	682	225	198	0,256
ПБС-63М	300	40	—	410	350	732	225	240	0,306
Исполнение IM210I									
ПБС-22М	200	22	165	250	205	458	140	53	0,011
ПБС-23М	200	22	165	250	235	488	140	61	0,012
ПБС-32М	225	28	185	284	260	528	150	79	0,024
ПБС-33М	225	28	185	284	310	578	150	91	0,031
ПБС-42М	240	30	215	304	225	564	160	97	0,045
ПБС-43М	240	30	215	304	270	609	160	113	0,056
ПБС-52М	264	36	265	350	265	627	180	146	0,109
ПБС-53М	264	36	265	350	315	677	180	165	0,129
ПБС-62М	300	40	300	410	300	682	225	208	0,256
ПБС-63М	300	40	300	410	350	732	225	250	0,306
Исполнение IM3601, IM3611, IM3631									
ПБС-22М	—	22	165	250	—	458	—	51	0,011
ПБС-23М	—	22	165	250	—	488	—	59	0,012
ПБС-32М	—	28	185	284	—	528	—	77	0,024
ПБС-33М	—	28	185	284	—	578	—	88	0,031
ПБС-42М	—	30	215	304	—	575	—	95	0,045
ПБС-43М	—	30	215	304	—	620	—	111	0,056
ПБС-52М	—	36	265	350	—	646	—	142	0,109

**Таблица В10. Технические данные двигателей ПС и ПСТ**

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Напряжение, В	Частота вращения, об/мин		кпд, %	Максимальный момент, Н м
			номинальная	максимальная		
ПС(Т)-31МУХЛ4	0,18	110	2200	4000	63	0,14
	0,25	110	3000	4000	64	0,14
ПС(Т)-41МУХЛ4	0,18	110	1500	3000	62	0,21
	0,12	110	1500	2000	60	0,22
	0,25	110	2200	4000	69	0,21
	0,37	110	3000	4000	70	0,21
	0,2	110	1000	2000	63	0,54
	0,2	220	1000	2000	63	0,44
ПС(Т)-51МУХЛ4	0,37	110	1500	3000	67	0,4
	0,37	220	1500	3000	66	0,4
	0,55	110	2200	4000	73	0,41
	0,55	220	2200	4000	73	0,41
ПС(Т)-52МУХЛ4	0,37	110	1000	2000	68	0,61
	0,37	220	1000	2000	69	0,61
	0,55	110	1500	3000	72	0,60
	0,55	220	1500	3000	72	0,6
	0,75	110	2200	4000	78	0,61
	0,75	220	2200	4000	79	0,61
ПС-52МУХЛ4	0,75	220	3000	4000	78	-
ПС(Т)-53МУХЛ4	0,4	110	1000	2000	71	0,9
	0,4	220	1000	2000	70	0,9
	0,63	110	1500	3000	76	0,9
	0,63	220	1500	3000	76	0,9
	0,9	110	2200	4000	80	0,83
	0,9	220	2200	4000	80	0,83
	1,1	220	3000	4000	81	0,9

**Таблица В11. Технические данные двигателей серии П**

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин при			Типоразмер двигателя серии 2П	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин, при напряжении, В		
			110	220	440				110	220	440
П-21	0,2	750	1500	1500	—	2ПН90 L	0,2	750	3000	1500	—
П-31	0,45	750	1500	1 500	—	2ПН1001,	0,42	750	3000	1500	—
П-31	0,45	750	—	3000	—	2ПН112М	0,6	800	3000	2500	—
П-32	0,7	750	1500	1500	—	2ПН112 L	0,8	750	3000	2500	—
П-32	0,7	750	—	3000	—	2ПН112 L	0,8	750	3000	2500	—
П-41	1	750	1500	1500	—	2ПН132М	1,6	750	3000	2500	—
П-41	1	750	—	3000	—	2ПН132М	1,6	750	3000	2500	—
П-42	1,5	750	1500	1500	—	2ПН132М	1,6	750	3000	2500	—

Продолжение табл.В11

П-51	2,2	750	1500	1500	—	2ПН132 L	1,9	750	3000	2500	1850
П-51	2,2	750	—	3000	—	2ПН1321,	1,9	750	3000	2500	1850
П-52	3,2	750	1500	1500	—	2ПН160М	3	750	3000	2500	1850
П-52	3,2	750	—	3000	—	2ПН160М	3	750	3000	2500	1850
П-61	4,5	750	1500	1500	—	2ПН1601,	4	750	3000	2500	1850
П-62	6	750	1500	1500	—	2ПН180М	5,6	750	3000	2500	1850
П-71	7	750	1500	1500	—	2ПН180 L	7,1	750	3000	2500	1800
П-72	10	750	1500	1500	—	2ПН200 L	11	800	3000	2500	1850
П-81	14	750	1500	1500	—	2ПН225М	15	750	—	2500	—
П-82	19	750	1500	1500	—	2ПН225 L	18,5	750	—	2500	1500
П-82	19	750	1500	1500	—	2ПН250М	22	750	—	2000	2400
П-91	25	750	1500	1500	—	2ПН250М	22	750	—	2000	2400
П-91	25	750	1500	1500	—	2ПН250 L	30	750	—	2000	—
П-92	32	750	1500	1500	1000	2ПН280М	45	750	—	2000	1200
П-101	42	750	1500	1500	1000	2ПН280М	45	750	—	2000	1200
П-102	55	750	1500	1500	800	2ПН2801,	55	750	—	2000	—
П-102	55	750	1500	1500	800	2ПН315М	55	750	—	—	1800
П-111	75	750	—	1500	800	2ПН315 L	75	750	—	1800	1800
П-81	19	1000	2000	2000	1800	2ПФ225М	22	1000	—	1000	1000
П-82	25	1000	2000	2000	1000	2ПФ225 L	30	1060	—	2500	2250
П-11	0,13	1000	2000	2000	—	2ПН90М	0,25	1060	4000	2000	—
П-12	0,2	1000	2000	2000	—	2ПН90М	0,25	1060	4000	2000	—
П-21	0,3	1000	2000	2000	—	2ПН90 L	0,34	1060	4000	2000	—
П-21	0,3	1000	—	3000	—	2ПН90 L	0,34	1060	4000	2000	—
П-22	0,45	1000	2000	2000	—	2ПН100М	0,5	1000	4000	2000	—
П-22	0,45	1000	—	3000	—	2ПН100М	0,5	1000	4000	2000	—
П-31	0,7	1000	2000	2000	—	2ПН112М	0,85	1060	4000	3500	—
П-31	0,7	1000	—	3000	—	2ПН112М	0,85	1060	4000	3500	—
П-32	1	1000	2000	2000	—	2ПН112 L	1,25	1060	4000	3500	—
П-32	I	1000	—	3000	—	2ПН112 L	1,25	1060	4000	3500	—
П-41	1,5	1000	2000	2000	—	2ПН112 L	1,25	1060	4000	3500	—
П-41	1,5	1000	—	3000	—	2ПН112L	1,25	1060	4000	3500	—
П-42	2,2	1000	2000	2000	1500	2ПН132М	2,5	1000	4000	3000	2500
П-42	2,2	1000	—	3000	—	2ПН132М	2,5	1000	4000	3000	2500
П-51	3,2	1000	2000	2000	1500	2ПН132 L	3	1000	4000	4000	3750
П-51	3	1000	—	3000	—	2ПН132 L	3	1000	4000	4000	3750

**Таблица В12. Технические данные двигателей серии ПС**

Типоразмер двигателя	Мощность, кВт	Номинальная частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин, при напряжении, В			Типоразмер двигателя серии 2П	Мощность кВт	Минимальная частота вращения, об/мин	Максимальная частота вращения, об/мин, при напряжении, В	
			110	220	440				110	220
ПС-41	0,18	1500	3000	3000		2ПБ90М	0,28	1500	4000	3000
ПБ-12	0,23	1500	2000	2000	—	2ПБ90М	0,28	1500	4000	3000
ПС-41	0,18	1500	3000	3000	—	2ПБ90М	0,28	1500	4000	3000
ПБ-21	0,35	1500	2000	2000	—	2ПБ90Б	0,37	1500	4000	3000
ПС-51	0,37	1500	3000	3000	—	2ПБ90Б	0,37	1500	4000	3000
ПБ-22	0,50	1500	2000	2000	—	2ПБЮ0М	0,60	1500	4000	3000
ПС-52	0,55	1500	3000	3000	—	2ПБ100М	0,6	1500	4001)	3000
ПБС-22	0,60	1500	3750	3750	—	2ПБ112М	0,75	1500	4000	4000
ПБ-31	0,65	1500	2000	2000	—	2ПБП2М	0,75	1500	4000	4000
ПБС-23	0,85	1500	3750	3750	—	2ПБП2М	0,75	1500	4000	4000
ПБ-32	1	1500	2000	2000	—	2ПБ112Б	1	1500	4000	4000
ПБС-32	1,2	1500	3750	3750	—	2ПБП21,	1	1500	4000	4000
ПБ-41	1,2	1500	2000	2000	1650	2ПБ112Б	I	1500	4001)	4000
ПБ-42	1,5	1500	2000	2000	1650	2ПБ132М	2,4	1600	4000	4000
ПБС-33	1,6	1500	3750	3750	—	2ПБ132М	2,4	1600	4000	4000
ПБ-51	1,9	1500	2000	2000	1650	2ПБ132М	2,4	1600	4000	4000
ПБС-42	2,1	1500	3750	3750	—	2ПБ132М	2,4	1600	4000	4000
ПБ-52	2,4	1500	2000	2000	1650	2ПБ132М	2,4	1600	4000	4000
ПБ-61	3,2	1500	2000	2000	1650	2ПБ1321,	3,2	1600	4000	4000
ПБС-43	2,8	1500	—	3750	—	2ПБ1321,	3,2	1600	4000	4000
ПБС-52	4,2	1500	—	3600	—	2ПБ160М	4,2	1600	4000	4000
ПБ-62	4	1500	2000	2000	1650	2ПБ160М	4,2	1500	4000	4000
ПБС-53	4,8	1500	—	3600	—	2ПБ160Б	5,3	1500	—	4000
ПБС-62	7,2	1500	—	3600	—	2ПБ180М	7,1	1500	3500	3500
ПБС-63	7,8	1500	—	3600	—	2ПБ1801,	8,5	1600	3500	3500
ПР-51	4,2	1500	2200	2200	1800	2ПО160М	6	1600	—	4000
ПР-52	5,1	1500	2200	2200	1800	2ПО160М	6	1600	—	4000
ПР-61	7	1500	2200	2200	1800	2ПО1601,	7,1	1500	4000	4000
ПР-62	9,5	1500	2200	2200	1800	2ПО180М	10	1500	3500	3500
ПС-31	0,18	2200	4000	—	—	2ПБ90М	0,4	2200	4000	4000
ПС-41	0,25	2200	4000	—	—	2ПБ90М	0,4	2200	4000	4000
ПБ-П	0,22	2200	2600	2600	—	2ПБ90М	0,4	2200	4000	4000
ПС-41	0,25	2200	4000	—	—	2ПБ90М	0,4	2200	4000	4000
ПБ-12	0,34	2200	2600	2600	—	2ПБ90М	0,4	2200	4000	4000
ПС-51	0,55	2200	4000	4000	—	2ПБ90М	0,40	2200	4000	4000

Продолжение табл.В12

БС-23	1,15	2200	4000	4000	—	2ПБ112М	1,1	2200	4000	4000
ПБ-32	1,45	2200	2600	2600	—	2ПБИ21,	1,5	2240	4000	4000
ПБС-32	1,5	2200	4000	4000	—	2ПБ1121,	1,5	2240	4000	4000
ПБ-41	1,7	2200	2600	2600	—	2ПБ1121,	1,5	2240	4000	4000
ПБС-33	2,1	2200	—	4000	—	2ПБ132М	3,7	2200	4000	4000
ПБС-42	2,9	2200	4000	4000	—	2ПБ132М	3,7	2200	4000	4000
ПБ-42	2,2	2200	2600	2600	—	2ПБ132М	3,7	2200	4000	4000
ПБ-51	2,8	2200	2600	2600	—	2ПБ132М	3,7	2200	4000	4000
ПБ-52	3,5	2200	2600	2600	—	2ПБ132М	3,7	2200	4000	4000
ПБС-43	3,8	2200	—	4000	—	2ПБ132М	3,7	2200	4000	4000
ПБС-52	5,5	2200	—	3600	—	2ПБ160М	6	2200	4000	4000
ПБС-53	6,3	2200	—	3600	—	2ПБ160Ъ	7,5	2240	4000	4000
ПБС-62	10	2200	—	3600	—	2ПБ180М	9,5	2200	3500	3500
ПБС-63	11	2200	—	3600	—	2ПБ1801,	11	2200	—	3500
ПР-51	5,9	2200	2900	2900	—	2П0132Ъ	5,3	2200	4000	4000

## Г. Датчики

### Г1. Оптико-электронные растровые преобразователи угловых перемещений.

Среди обширного класса преобразователей перемещений (линейных и угловых), предназначенных для информационной связи по положению между позиционируемым объектом и устройством числового программного управления (УЧПУ) или устройством цифровой индикации (УЦИ), безусловным лидером являются оптико-электронные растровые преобразователи.

Названные преобразователи позволяют сегодня решать задачи информационной связи не только величин линейных и угловых перемещений, но и без потери точности могут обеспечить 'жесткую\* координатную привязку различного рода позиционируемых объектов при их статическом положении. Часто такие преобразователи называют преобразователями считывания, абсолютными преобразователями или датчиками положения (линейного или углового).

Особенность оптико-электронных растровых преобразователей заключается в использовании в качестве меры длины или угла соответственно линейной или радиальной шкалы, являющейся носителем регулярного и кодового растров. Возможность нанесения штрихов растров с субмикронной точностью на материалы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения, а также стабильность их геометрического положения, открывают растровым преобразователям широкие перспективы применения.

Достаточно высокая степень защищенности конструктивного исполнения преобразователей, а также их высокая устойчивость к внешним воздействиям, обеспечили оптико-электронным растровым преобразователям широкий спектр областей промышленного и научного применения.

В настоящем проспекте представлены выпускаемые СКВ ИС преобразователи угловых перемещений, их технические, установочные и эксплуатационные характеристики.

Оптико-электронные растровые измерительные преобразователи угловых перемещений осуществляют синхронное преобразование текущего значения аналоговой величины угла поворота входного вала в адекватные значения ортогональных электрических сигналов, име-

ющих координатно - периодический характер. При этом временной масштаб сигналов пропорционален текущей скорости этого перемещения, а количество колебаний кратно числу штрихов регулярного раstra или дробной части их периода, содержащихся в данном перемещении.

Устройства обработки измерительной информации приводят сигналы преобразователя к одному из унифицированных видов, которые могут быть использованы для дальнейшей обработки в системах ЧПУ.

### **Принцип действия преобразователей**

Преобразователь содержит два кинематически связанных функциональных узла: радиальную растровую шкалу 1, жестко связанную с валом преобразователя, и растровый анализатор 2 неподвижного считывающего узла.

Радиальная растровая шкала (далее везде лимб) содержит две концентрические информационные дорожки: регулярного раstra и референтных меток Б.

Растровый анализатор содержит окна накапливающего (инкрементного) считывания и участок референтной метки Д, Окна позиционно согласованы с дорожкой регулярного раstra лимба и имеют внутри растры А,  $\bar{A}$  и В,  $\bar{B}$  с шагом, равным шагу регулярного раstra лимба. При этом, в каждой паре окон растры смещены друг относительно друга на величину, равную половине их шага, а взаимный пространственный сдвиг растр между парами окон составляет четверть шага растр, Последовательно с растровыми окнами расположено прозрачное окно Г.

Референтная метка Д позиционно согласована с дорожкой референтных меток лимба, Считывающий узел решает задачу реализации оптических растровых и кодовых сопряжений, информативно соответствующих величине углового перемещения, и задачу считывания, обработки и анализа текущих значений оптически информативных параметров указанных сопряжений.

Конструктивно эти задачи решает инкрементный узел преобразователя Первую из них решает оптико - механическая часть этого узла, обеспечивая необходимую точность оптического растрового сопряжения лимба и анализатора, а также соосность последних по от-

ношению к оси вращения вала, вторую реализуют осветители, плата квадрантных фотоприемников (фотодиодов) и плата электрической схемы выделения и обработки информации о перемещении. В качестве осветителей используются излучающие диоды 3 и 4, осуществляющие засветку соответствующих окон анализатора и пространственно согласованных с ними фотоприемных площадок (секций) квадрантных фотодиодов 5 и 6, Излучающий диод 3, конденсор 7, формирующий параллельный пучок лучей осветителя, окна А,  $\bar{A}$  и В,  $\bar{B}$  анализатора и фотоприемник 6 образуют так называемый канал считывания.

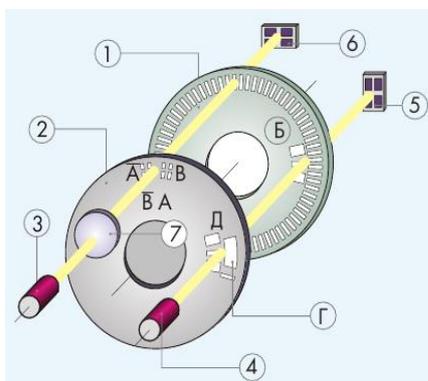


Рис. Г1 Считывающий узел

1 - радиальная растровая шкала, 2 - растровый анализатор, 3 - излучающий ДИОД, 4 - излучающий ДИОД, 5 - квадрантный фотодиод, 6 - квадрантный фотодиод, 7 – конденсор

Требование повышенной точности преобразователей диктует применение двух или четырех таких диаметрально расположенных каналов считывания.

Принцип работы преобразователей угловых перемещений основан на регистрации относительной величины прошедшего через растровое сопряжение потока оптического излучения как координатно - периодической функции взаимного углового положения регулярного роста лимба и растров окон анализатора.

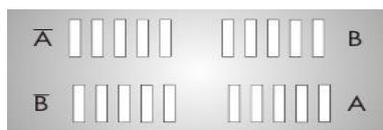


Рис. Г2 Растровый анализатор

При повороте входного вала преобразователя относительно его корпуса растровые сопряжения лимба и анализатора модулируют проходящие через них потоки излучения, воспринимаемые соответствующими секциями квадрантного фотодиода 6.

Упомянутое выше сочетание пространственных фаз растров  $A$ ,  $B$  и  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$  обуславливает аналогичные фазовые соотношения электрических сигналов, снимаемых с секций фотоприемника 6. Данное обстоятельство позволяет сформировать два ортогональных координатно-периодических сигнала  $I_A$  и  $I_B$ , исключив из них постоянную составляющую. Взаимный характер изменения указанных сигналов дает возможность определить направление регистрируемого угла поворота, а число их колебаний при данном перемещении их величину. Специальная обработка сигналов  $I_A$  и  $I_B$ , основанная на современных методах их координатной интерполяции, позволяет обеспечить контроль угловых перемещений с дискретностью, много меньшей периода регулярного растра.

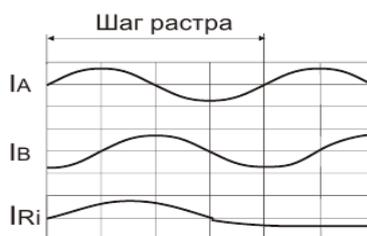


Рис. Г3 Шаг растра

Взаимный характер изменения указанных сигналов дает возможность определить направление регистрируемого угла поворота, а число их колебаний при данном перемещении - их величину, Специальная обработка сигналов  $I_A$  и  $I_B$ , основанная на современных методах их координатной интерполяции, позволяет обеспечить контроль угловых перемещений с дискретностью, много меньшей периода регулярного растра.

Для возможности задания собственного начала отсчета преобразователь вырабатывает сигнал  $I_{Ri}$  референтной метки, в общем случае, один раз за оборот вала.

Для формирования указанного сигнала используется канал считывания взаимного положения референтных меток Б и Д лимба и анализатора соответственно, Эти метки идентичны и представляют собой

участок специального растра с заданной функцией расположения штрихов и их ширины.

В процессе их совмещения с двух секций фотоприемника 5, оптически сопряженных с референтной меткой Д, снимается аналоговый сигнал  $I_{Ri}$  координатно-зависимой величины с ярко выраженным максимумом, Этот сигнал используется устройством обработки для координатной привязки положения вала к началу отсчета преобразователя. При этом учитывается значение опорного сигнала, снимаемого с двух других секций фотоприемника Б, соответствующих прозрачному окну Г анализатора.

Если требуется определить положение вала преобразователя, не производя его полный оборот, используется система координатно-кодированного расположения референтных меток, либо вместо референтных меток наносится специальный односторонний код положения (квазиабсолютный датчик).

В квази абсолютных датчиках (ЛИР-ДК136А) для такого определения достаточно повернуть вал на угол  $1,93^{\circ}$ .

В абсолютных датчиках углового положения (ЛИР-ДА119А; ЛИР-ДА136А; ЛИР-ДА158Д; ЛИР-ДА190А; ЛИР-ДА219А, Б) код углового положения вала может быть считан с выхода датчика сразу после включения литания.

## **Г2. Оптико-электронные растровые преобразователи линейных перемещений.**

Среди обширного класса преобразователей преобразователи линейных перемещений, предназначенных для информационной связи по положению между позиционируемым объектом и устройством числового программного управления |УМПУ| или устройством цифровой индикации (УЦИ) безусловным лидером в данном классе измерительных преобразователей являются оптико-электронные растровые преобразователи, Названные преобразователи позволяют сегодня решать задачи прецизионных измерений не только величины линейных перемещений, но и без потери точности могут обеспечить жесткую координатную привязку различного рода позиционируемых объектов при их статическом положении. Часто такие измерительные преобра-

зователи называют преобразователями считывания, абсолютными преобразователями или датчиками положения.

Особенность линейных оптико-электронных растровых преобразователей заключается в использовании в качестве меры длины пикетной шкалы, являющейся носителем регулярного и кодового растров. Возможность нанесения штрихов растра с субмикронной точностью на материалы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения, а также стабильность их геометрического положения, открывают растровым преобразователям широкие перспективы применения.

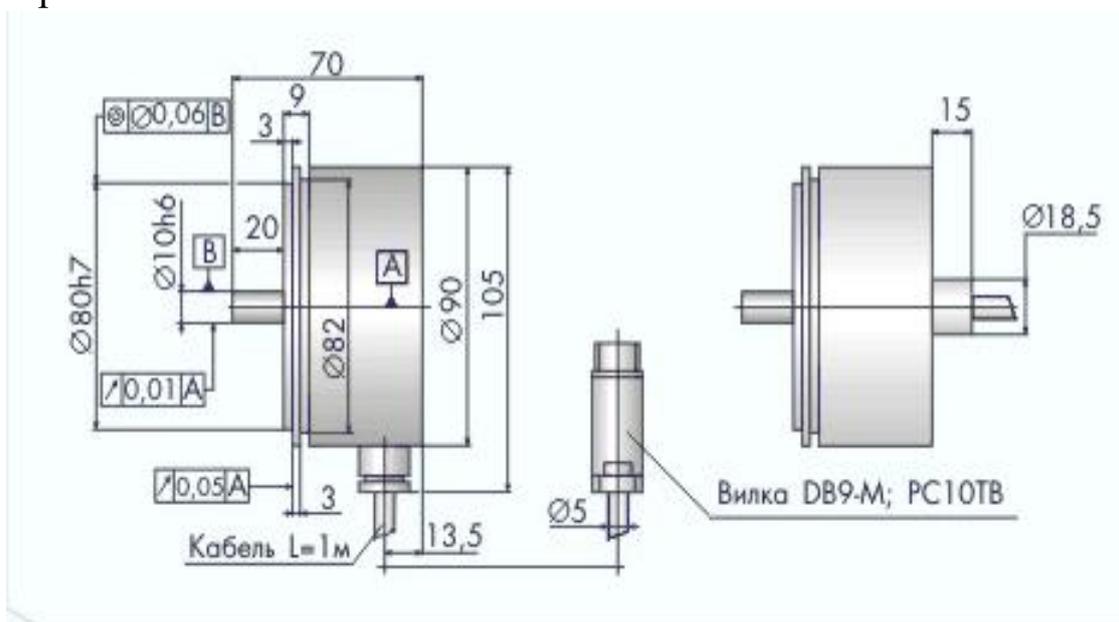


Рис. Г4. Абсолютный датчик углового положения ЛИР-ДА190А

Таблица Г1 Электрические и механические характеристики

Количество разрядов	18...21
Тип выходного кода	двоичный код
Способ выдачи данных	последовательный SSI
Напряжение питания	+ 5В
Вид выходного сигнала	RS485
Ток потребления	220 mA
Макс, скорость вращения вала без сбоя выходного кода	300об/мин
Точность	±3,5"

Окончание табл.			
Макс, скорость вращения вала	4000 об/мин	Степень защиты	IP64
Момент трогания ротора (20°C)	< 0,01 Н-м	Интервал рабочих температур	(0 – 70) <sup>0</sup> С
Момент инерции ротора	2,0x10 <sup>-5</sup> кг-м <sup>2</sup>	Вибрационные ускорения в диапазоне частот	<100м/с <sup>2</sup>
Допустимая осевая нагрузка на вал	<10Н	{ 55,,2000) Гц	
радиальная	< 10Н	Ударное ускорение (10 нс)	300 м/с <sup>2</sup>
Масса (без кабеля)	0,7 кг	Рекомендуемая муфта	ЛИР-803

Достаточно высокая степень защищенности конструктивного исполнения преобразователей, а также их высокая устойчивость к внешним воздействиям обеспечили оптико-электронным растровым преобразователям широкий спектр областей промышленного и научного применения.

Оптико-электронные растровые преобразователи линейных перемещений осуществляют синхронное преобразование текущего значения аналоговой величины линейного перемещения в адекватные значения ортогональных электрических сигналов, имеющих координатно-периодический характер. При этом временной масштаб сигналов пропорционален текущей скорости этого перемещения, число колебаний кратно числу штрихов регулярного раstra или дробной части их периода, содержащихся в данном перемещении.

Устройства обработки информации о перемещении, приводят сигналы преобразователя к одному из унифицированных видов, которые могут быть использованы для дальнейшей обработки в системах УЧПУ, УЦИ или в компьютерах.

### **Принцип действия преобразователя линейных перемещений**

Преобразователь имеет два кинематически связанных функциональных звена: растровую шкалу 1 и анализатор 2 считывающего узел, который позволяет регистрировать величину их относительного перемещения окну Г анализатора.

Растровая шкала 1 содержит две параллельные информационные дорожки: регулярного растра и референтных меток.

Растровый анализатор содержит четыре окна А, А, В, В накапливающего (инкрементного) считывания и окно референтной метки Б.



Названные выше четыре окна позиционно согласованы с дорожкой регулярного растра шкалы. Шаги растров в окнах равны шагам регулярного растра шкалы (20мкм или 40мкм). При этом в каждой паре окон растры смещены друг относительно друга на величину, равную половине их шага, а взаимный пространственный сдвиг растров между парами окон составляет четверть шага растров. Последовательно с растровыми окнами расположено прозрачное окно Г. Референтная метка Б позиционно согласована с дорожкой референтных меток шкалы.

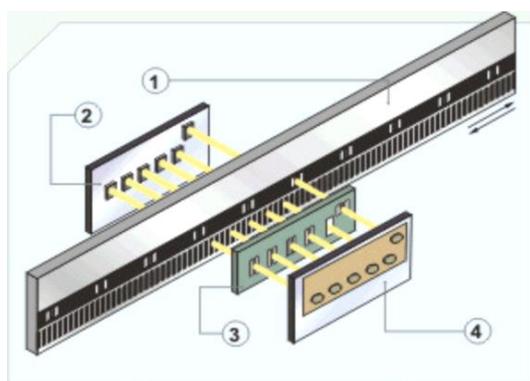
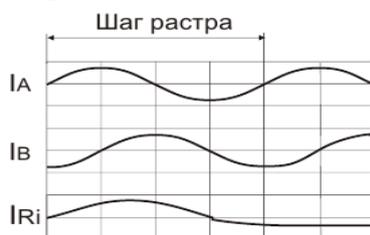


Рис Г5-Считывающий узел  
1- линейка, 2 – плата фотодиодов, 3- растровый анализатор, 4- плата осветителей

Считывающий узел (считывающая головка) преобразователей ЛИР-7...10 решает задачу реализации оптических растровых и кодовых сопряжений, информативно соответствующих величине линейного перемещения, а также задачу считывания, обработки и анализа текущих значений оптически информативных параметров указанных сопряжений.



Конструктивно первую задачу решает каретка, жестко связанная с анализатором, находящаяся через подшипники качения в контакте со шкалой, обеспечивая при этом относительное перемещение шкалы и анализатора. Вторую задачу реализуют платы фотоприемников 3 и осветителей 4, установленные на ту же каретку и плата электрической схе-

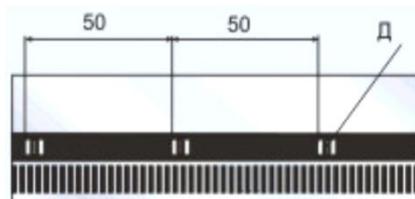
мы выделения и обработки информации о перемещении, расположенная в корпусе считывающей головки. Плата осветителей содержит шесть излучающих диодов, обеспечивающих засветку соответствующих окон анализатора и пространственно согласованных с ними приемных площадок шести фотодиодов.

В основу работы преобразователей положен метод оптико-электронного сканирования штриховых растров. При относительном перемещении шкалы и анализатора сопряжения регулярного раstra с растрами А, А, и В, В модулируют проходящие через них потоки излучения, воспринимаемые соответствующими фотоприемниками. Построенный таким образом канал считывания информации позволяет сформировать два ортогональных периодических сигнала  $I_a$  и  $I_b$  исключив из них постоянную составляющую. Взаимный характер изменения указанных сигналов дает возможность определить направление перемещения, а число их периодов при данном перемещении его величину. Специальные методы обработки сигналов  $I_a$  и  $I_b$  позволяют обеспечить контроль перемещения с дискретностью, много меньшей периода регулярного раstra.

Для возможности задания собственного начала отсчета системы в преобразователях перемещения используется дорожка референтных меток, содержащая, как минимум, одну функционирующую референтную метку, представляющую собой специальный растр, с заданной функцией расположения штрихов и их ширины.

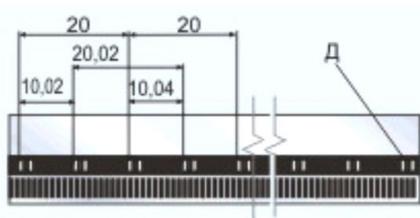
В процессе относительного перемещения шкалы и считывающей головки при совмещении полей Д шкалы и поля Б анализатора, с фотоприемника, сопряженного с полем Б снимается аналоговый сигнал координатно - зависимой величины с ярко выраженным максимумом. Этот сигнал используется устройством обработки для координатной привязки считывающего узла к началу отсчета преобразователя.

При этом учитывается значение опорного сигнала, задаваемого фотоприемником, соответствующим окну Г анализатора.



В преобразователях ЛИР-7...10 перемещающимся элементом в процессе эксплуатации может быть как шкала, так и считывающая головка. Выбор делает потребитель при монтаже преобразователя на своем изделии.

В преобразователях ЛИР-14, 15 и 17 шкала жестко связана со штоком, который получает рабочее перемещение относительно анализатора неподвижного считывающего узла через контакт его накопника с изделием потребителя.



С целью координатной привязки считывающего узла к началу отсчета преобразователя применяется координатно - кодированное расположение ряда референтных меток Д.

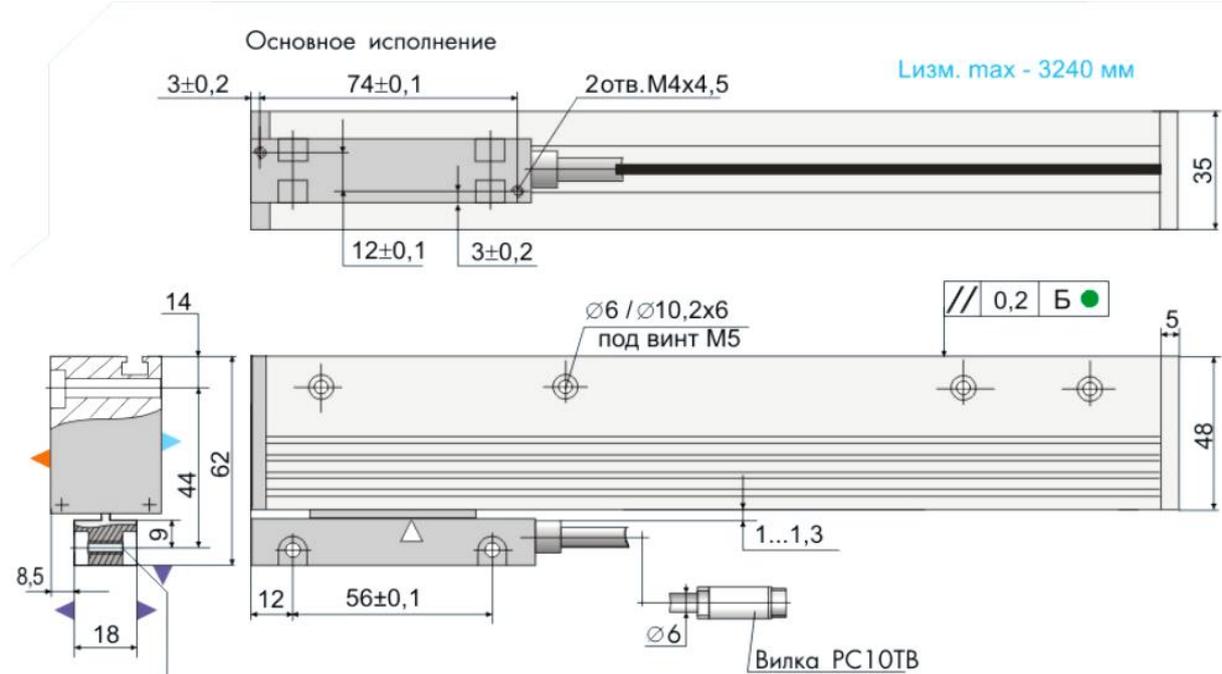
Референтные метки шкалы идентичны референтной метке Б анализатора, В процессе их совмещения с фотоприемника, оптически сопряженного с референтной меткой Б, снимается аналоговый сигнал координатно - зависимой величины с ярко выраженным максимумом.

Этот сигнал ( или сигналы, в случае прохождения считывающим узлом, как минимум, двух координатно-кодированных референтных меток), используется(ются) устройством обработки для координатной привязки считывающего узла к началу отсчета преобразователя, При том учитывается значение опорного сигнала, задаваемого фотоприемником соответствующим прозрачному окну Г анализатора.

Логическим развитием функциональных возможностей преобразователей, использующих последовательность координатно-кодированных референтных меток, явилось создание квазиабсолютных линейных датчиков, в которых дорожка референтных меток вменена кодовой дорожкой. Это дает возможность определять координату положения считывающего узла после включения питания при и относительном сдвиге, не превышающем 0,5 мм, что обеспечивает ему свойства абсолютного преобразователя на протяжении всего цикла работы до выключения.

# Преобразователь линейных перемещений ЛИР -10

Разрешающая способность преобразователя до 0,1мкм

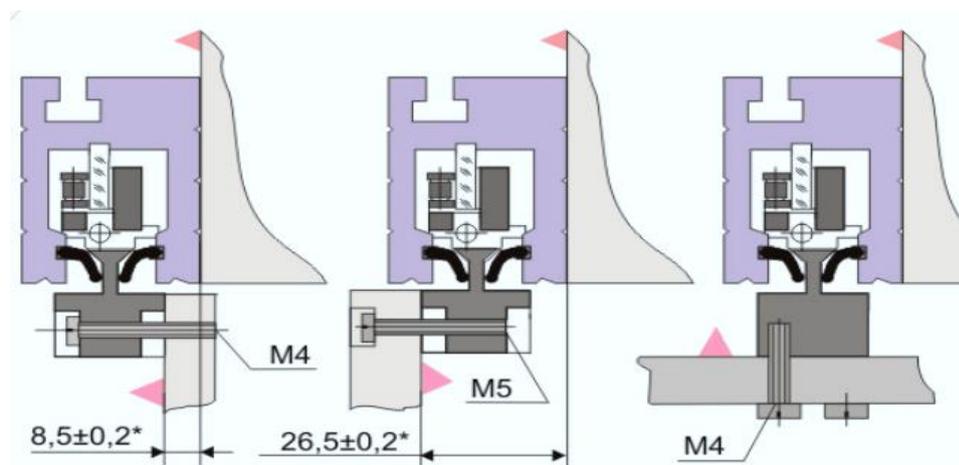


- ▲ - установочные базы головки преобразователя
- ▲▲ установочные базы корпуса преобразователя

Выбег головки за пределы L изм. - по 10 мм в обе стороны

Варианты установки головки преобразователя

- ▲ - установочные базы исполнительного механизма



- - расстояние между базами исполнительного механизма

Масса преобразователя (без кабеля), кг -  $0.100+2.0L$ . где  $L = L_{изм} + 0.095$  в метрах

### ГЗ. Индуктивные датчики

**Резольвер** – поворотный трансформатор, применяемый как абсолютный датчик угла поворота.

---



Тип резольвера

ER5Kd286, ER5Kd290, ER5Kd323, ER5Kd348, ER5Kd350, ER5Kd371, ER5Kd330, ER5Kd354

#### Основные параметры

Параметр	Ед. изм.	Значение
Напряжение	В	7
Частота	кГц	10
Число полюсов		2 и 6
Коэффициент трансформации		0,5
Размеры	мм	Ø9,25 / Ø36,83 × 16
Масса	кг	0,09

#### Общая информация о резольверах

Электрическая машина переменного тока. Так по-другому называется вращающийся трансформатор. Данное устройство позволяет преобразовать угол поворота ротора в переменный ток. В свою очередь переменный ток пропорционален углу поворота или некоторым его функциям.

Такое определение дается в специализированной литературе и является теоретически и практически верным. Работает на принципе изменения связи (взаимоиндукции) между обмотками статора и ротора. Вращающийся трансформатор (резольвер) имеет двухфазную обмотку статора и однофазную ротора. Обмотки статора ориентированы под углом 90 град, друг к другу. Питание резольвера может быть подключено к ротору или статору.

## Резольвер: устройство и область применения

Данное оборудование имеет свое строение. Чаще всего они бывают двухполюсными, реже – многополюсными. Резольвер состоит из статора и ротора. То есть из неподвижной и подвижной. Обе части конструкции статор и ротор набираются из листов особой электро-технической стали. В пазы устройства укладываются по две взаимно перпендикулярные обмотки. Здесь стоит отметить, что вращающийся трансформатор может быть, как контактный с ограниченным углом поворота ротора, так и бесконтактным – с неограниченным углом поворота ротора. Данная конструкция позволяет добиться высокой точности в работе, что в свою очередь дает возможность использовать устройство там, где необходимо получить данные, незаметные невооруженному глазу.

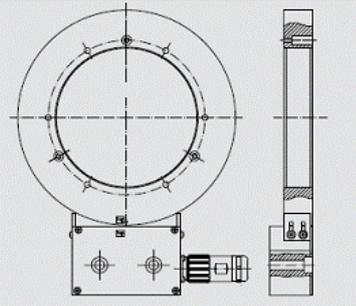
Область применения. Резольвер применяется в автоматических вычислительных машинах, которые призваны производить решение сложных задач и операций. Так же их применяют в автоматически регулируемых системах. В данном случае вращающийся трансформатор превращается в своего рода измеритель рассогласования, который способен зафиксировать отклонение системы от заданного положения. Работа высокоточного оборудования с крутящими элементами. Резольвер способен определить угловое перемещение вала двигателя.

## Характеристики резольверов

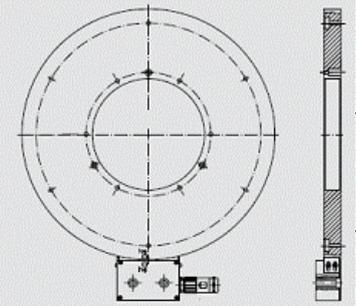
### HOGS 151

Количество импульсов на 1 оборот вала:	1024, 5000		Сквозной полый вал диаметром до $d=75$ мм
Полоса частот:	200 кГц		Сниженное содержание высших гармонических
Амплитуда выходного сигнала:	Приблиз. 1 $V_{pp}$		
Допустимая температура энкодера:	-20 °C to +85 °C		
Присоединение:	кабель		
Вес:	3,2 кг		
Ударопрочность	2.000 м/с <sup>2</sup>		
Степень защиты:	IP 54		

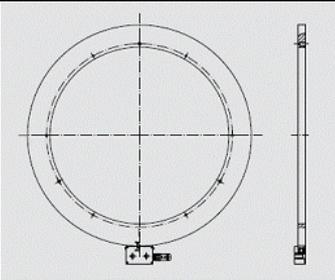
## MHGE 200B5

Количество импульсов на один оборот вала:	128		Сквозной полый вал диаметром 50 ... 180мм
Амплитуда выходного сигнала	Приблизительно 1 Vpp		Большое допустимое осевое смещение
Вибростойкость (55 ... 2000 Гц):	300 м/с <sup>2</sup>		Большой допуск воздушного зазора
Допустимая рабочая температура:	От -40 °С до +100 °С	Опция: дополнительные инкрементальные сигналы	
Присоединение:	12 полюсная фланцевая соединительная муфта		
Ударопрочность	3000 м/с <sup>2</sup>		
Уровень защиты:	колесо IP 68 / головка IP 67		

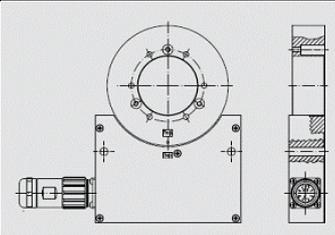
## MHGE 400B5

Количество импульсов на один оборот вала:	256		Сквозной полый вал диаметром 100 ... 380мм
Амплитуда выходного сигнала:	Приблизительно 1 Vpp		Большое допустимое осевое смещение
Допустимая рабочая температура:	-40 °С до +100 °С		Опция: дополнительные инкрементальные сигналы
Присоединение:	12 полюсная фланцевая соединительная		
Вибростойкость 55 ... 2000 Гц	300 м/с <sup>2</sup>		
Ударопрочность:	3000 м/с <sup>2</sup>		
Уровень защиты:	колесо IP 68 / головка IP 67		

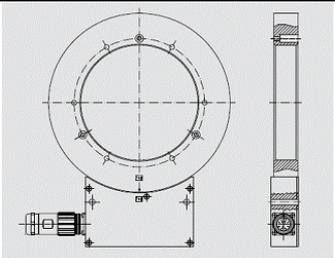
## MHGE 800B5

Количество импульсов на один оборот вала:	512		Сквозной полый вал диаметром 380 ... 740мм
Амплитуда выходного сигнала:	Приблизительно 1 Vpp		Большое допустимое осевое смещение
Допустимая рабочая температура:	-40 °С до +100 °С		Опция: дополнительные инкрементальные сигналы
Присоединение:	12 полюсная фланцевая соединительная муфта		
Вибростойкость (55 ... 2000 Гц):	300 м/с <sup>2</sup>		
Ударопрочность	3000 м/с <sup>2</sup>		
Уровень защиты:	колесо IP 68 / головка IP 67		

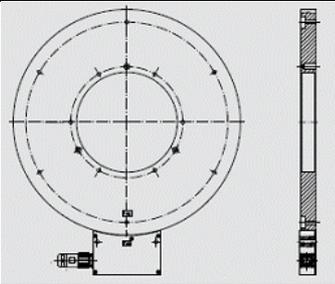
## MHGP 100B5

Количество импульсов на один оборот вала:	64, 128, ..., 1024, ... 8192		Сквозной полый вал диаметром 20 ... 80мм
Полоса пропускания:	400 кГц		Большое допустимое осевое смещение
Амплитуда выходного сигнала:	Приблизительно 1 Vpp		Большой допуск воздушного зазора
Допустимая рабочая температура:	-20 °С до +85 °С	Опция: выход сигнализации об ошибке	
Присоединение:	12 полюсная фланцевая соединительная муфта		
Вибростойкость (55 ... 2000 Гц)	300 м/с <sup>2</sup>		
Ударопрочность	3000 м/с <sup>2</sup>		
Уровень защиты:	колесо IP 68 / головка IP 67		

## МНГР 200В5

Количество импульсов на один оборот вала: 128, 256... 1024,.... 16384		Сквозной полый вал диаметром 50 ... 180мм
Вибростойкость (55 Гц ... 2000 Гц): 300 м/с <sup>2</sup>		
Ударопрочность (2мс): 3000 м/с <sup>2</sup>		
Полоса пропускания: 400 кГц	Большое допустимое осевое смещение	
Амплитуда выходного сигнала:	Приблизительно 1 Vpp	Большой допуск воздушного зазора
Допустимая рабочая температура:	-40 °С до +100 °С	Опция: выход сигнализации об ошибке
Присоединение:	12 полюсная фланцевая соединительная муфта	
Уровень защиты:	колесо IP 68 / головка IP 67	

## МНГР 400В5

Количество импульсов на один оборот вала:	256, 512, 1024, ...32768		Сквозной полый вал диаметром 100 ... 380мм
Полоса пропускания:	400 кГц		Большое допустимое осевое смещение
Амплитуда выходного сигнала:	Приблизительно 1 Vpp		Большой допуск воздушного зазора
Допустимая рабочая температура:	-40 °С до +100 °С		Опция: выход сигнализации об ошибке
Присоединение:	12 полюсная фланцевая соединительная муфта		
Вибростойкость (55 Гц 2000 Гц):	300 м/с <sup>2</sup>		
Ударопрочность	3000 м/с <sup>2</sup>		
Уровень защиты:	колесо IP 68 / головка IP 67		

## Г4. Резольверы типа ЛИР

### ЛИР-ДР158А

Резольвер - преобразователь угловых перемещений на основе вращающегося трансформатора. Разработан для тяжелых условий эксплуатации, Принцип действия – электромагнитный. Температурный диапазон от -40 до +100 С, Диаметр корпуса 57 мм. Точность  $\pm 10$  угловых минут. Особенности: Отсутствие оптических элементов и электронных компонентов. Применяется в приводах в качестве датчика углового перемещения.



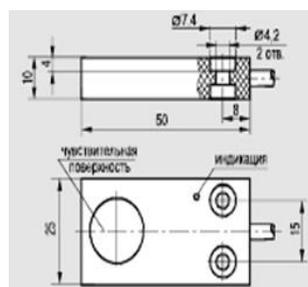
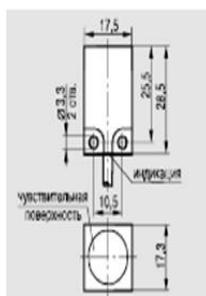
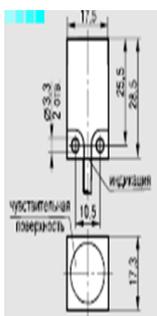
Цельный вал.

### ЛИР-ДР250А

Резольвер - преобразователь угловых перемещений на основе вращающегося трансформатора. Разработан для тяжелых условий эксплуатации, Принцип действия - электромагнитный. Температурный диапазон от -40 до +100 С. Диаметр корпуса 50 мм. Точность  $\pm 10$  угловых минут. Особенности: Отсутствие оптических элементов и электронных компонентов. Применяется в приводах в качестве датчика углового перемещения. Полый вал.



## Д. Концевые выключатели

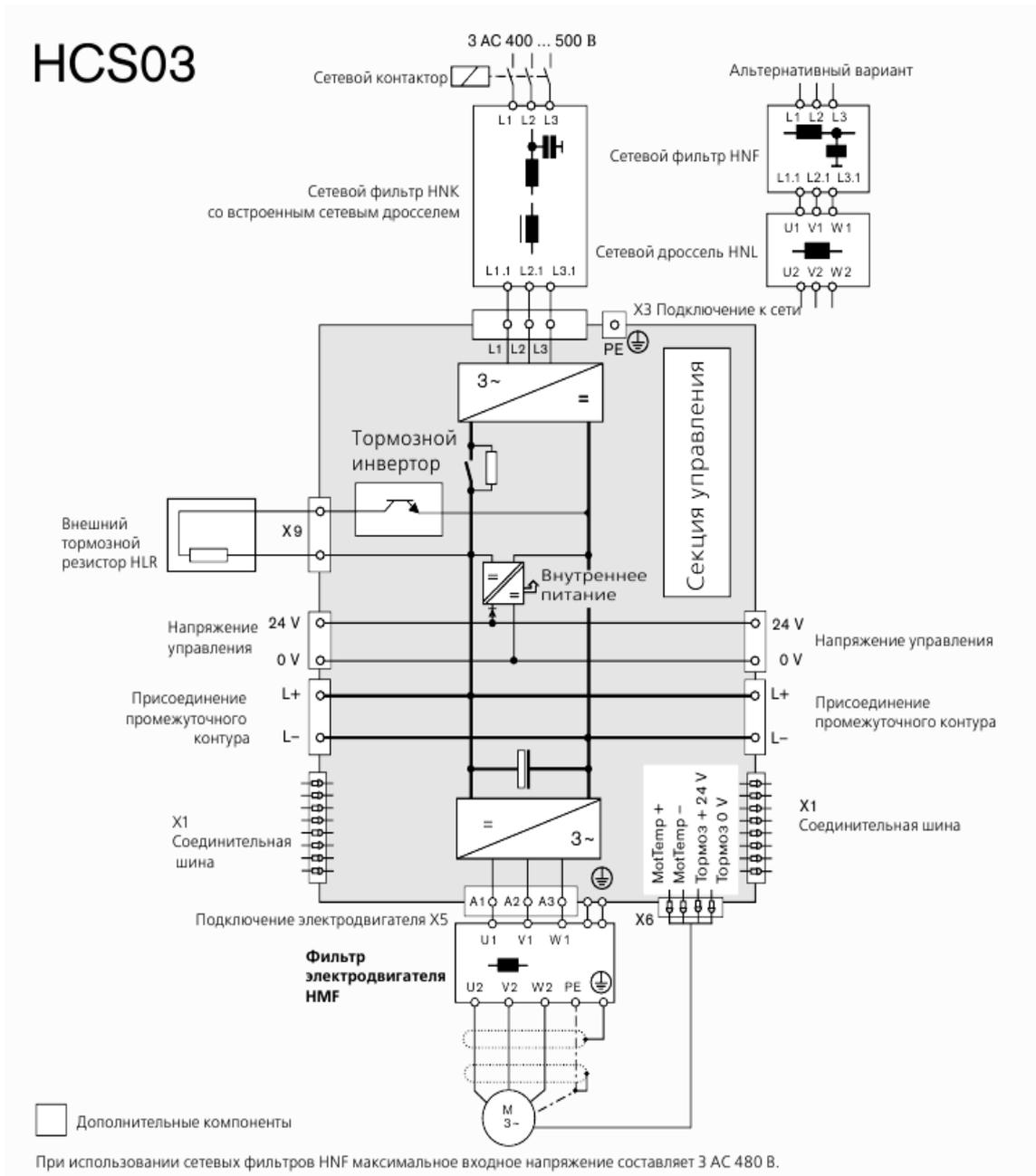


### Технические данные

17,5x17,3x28,5 (I31)	17,5x17,3x28,5 (I31)	17,5x17,3x28,5 (I31)	25x50x10 (I4)	25x50x10 (I4)
Встраиваемый	Встраиваемый	Встраиваемый	Встраиваемый	Встраиваемый
3,5мм	5мм	8 мм	5мм	5мм
0,,2,8мм	0,,4мм	0,, 6,4 мм	0,,4мм	0,4 мм
10,,30 В DC	10, 30 В DC	10,,30В DC	10,,30В DC	10,,30 В DC
250 mA	250 mA	250 mA	250/500 mA	400 mA
1,5В	1,5В	1,5В	1,5 В	2,5 В



# Структурная схема привода



*Учебное издание*

ВЕСЕЛОВ Олег Вениаминович

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕХАТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Учебное пособие

*Издается в авторской редакции*

Подписано в печать 28.03.19.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 9,77. Тираж 50 экз.

Заказ

Издательство

Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.